



T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS

Atakan ARSLAN

RÜZGAR TÜRBİNLERİ KANAT
AÇISININ YAPAY SİNİR AĞLARI İLE
KONTROLÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

OSMANIYE – 2022

**T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RÜZGAR TÜRBİNLERİ KANAT AÇISININ YAPAY SİNİR
AĞLARI İLE KONTROLÜ**

Atakan ARSLAN

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**OSMANIYE
NİSAN-2022**

TEZ ONAYI

RÜZGAR TÜRBİNLERİ KANAT AÇISININ YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KONTROLÜ

Atakan ARSLAN tarafından Doç. Dr. Halil EROL danışmanlığında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanan bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Halil EROL
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Üye: Prof. Dr. Ahmet Serdar YILMAZ
Kontrol Sistemleri Anabilim Dalı,
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Üye: Doç. Dr. Şahin SÖNMEZ
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı,
Malatya Turgut Özal Üniversitesi

Yukarıdaki jüri kararı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve /..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Bülent Yanıktepe
Enstitü Müdürü, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Bu Çalışma OKÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: OKÜ BAP-2020-PT3-012

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, bu çalışma sonucunda elde edilmeyen her türlü bilgi ve ifade için ilgili kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını ve bu tezin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Atakan ARSLAN



ÖZET

RÜZGAR TÜRBİNLERİ KANAT AÇISININ YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KONTROLÜ

Atakan ARSLAN
Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Halil EROL

Nisan 2022, 108 sayfa

Rüzgâr enerjisini kullanarak elektrığe dönüştüren sistemlerin optimal güç çıkışı vermesi için elektriksel yollarla kontrol edilmesi gerekir. Çeşitli kontrol yöntemleri olmakla beraber buna genel olarak kanat açısı kontrolü denilmektedir. Kanat açısı kontrolü ile değişken hızlı bir rüzgâr türbinin çalışması değişken rüzgâr hızlarında kontrol edilebilir. Kanat açısı kontrolü çeşitli kontrol yöntemleri kullanılarak elde edilebilir. Bu çalışmada geleneksel PID, yapay sinir ağları (YSA) ve Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kullanılarak kanat açısı kontrolü sağlanmıştır. Yapay sinir ağı yöntemi olarak geri beslemeli ağ kullanılmıştır. Yapılan çalışmada kanat açısı DC servo motor aracılığıyla kontrol edilmiştir. DC servo motor çıkışı kanat açısını vermektedir ve rüzgâr türbini güç katsayısını ayarlamaktadır. Sonuçta ANFIS kontrolör, YSA ile tasarlanan sistemin sonuçlarına yakın olsa da daha iyi sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr türbini, kanat açısı, Yapay Sinir Ağı, ANFIS, PID

ABSTRACT

CONTROL OF WIND ANGLE OF WIND TURBINES WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Atakan ARSLAN
PhD, Department of Electrical-Electronic Engineering
Supervisor: Assoc. Prof. Halil EROL

April 2022, 108 pages

Systems that convert wind energy into electricity must be electrically controlled to give optimal power output. Although there are various control methods, this is generally called wing angle control. With pitch angle control, the operation of a variable speed wind turbine can be controlled at variable wind speeds. Pitch angle control can be achieved using a variety of control methods. In this study, pitch angle control was achieved by using traditional PID, artificial neural networks (ANN) and Adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS). Feedback network was used as the artificial neural network method. In the study, the pitch angle was controlled by a DC servo motor. DC servo motor output gives the pitch angle and adjusts the wind turbine power coefficient. As a result, although the ANFIS controller is close to the results of the system designed with ANN, it gave better results.

Key Words: Wind Turbine, pitch angle, ANN, ANFIS, PID



TEŞEKKÜR

Bu zorlu süreçte her türlü desteğini gösteren, yanımda olan annem Sultan ARSLAN, babam Osman ARSLAN ve tez Danışmanım sayın Doç. Dr. Halil EROL'a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
TEZ BİLDİRİMİ	
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İTHAF SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	x
1. RÜZGAR ENERJİSİ HAKKINDA BİLGİLER.....	1
1.1. Rüzgâr Enerjisinin Tarihsel Gelişimi.....	1
1.2. Günümüzde Rüzgâr Enerjisi.....	2
1.3. Rüzgâr Enerjisinin Geleceği.....	4
1.4. Rüzgâr Enerjisinin Kaynağı.....	4
2. RÜZGAR TÜRBİNLERİ ÇEŞİTLERİ ([14])	5
3. TÜRBİN ELEMANLARI.....	7
3.1. Kanatlar	8
3.2. Pitch Mekanizması	8
3.3. Vites Kutusu	8
3.4. Rotor mekanik freni	9
3.5. Jeneratör.....	9
3.6. Sapma Sürücüsü.....	10
3.7. Kule	10
3.8. Anemometre.....	10
4. JENERATÖRLER.....	11
4.1. Sincap Kafesli İndüksiyon Jeneratörü (SCIG).....	11
4.2. Çift Beslemeli İndüksiyon Jeneratörü (DFIG).....	11
4.3. Senkron Jeneratör (SG)	12
5. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	14
6. RÜZGÂR TÜRBİNİ GÜÇ KARAKTERİSTİĞİ.....	29
7. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ KONTROLÜ	30
7.1. Pasif Stall Kontrol.....	30
7.2. Aktif Stall Kontrol	30
7.3. Kanat Açısı Kontrolü	31
8. RÜZGÂR GÜCÜ	32
8.1. Rotor Alanı	32
8.2. Uç-Hız Oranı.....	33
8.3. Hava Yoğunluğu	33
8.4. Güç Katsayısı	33
8.5. Rüzgâr Gücünün Matematiksel Modeli	34
9. PID KONTROL.....	36
9.1. Tasarım İlkeleri.....	37
9.2. PID Denetimin Avantaj ve Dezavantajları	37

9.3.	PID Denetimin Kontrolör Modeli	37
9.4.	PID Kontrolörlerin Özellikleri	38
10.	YAPAY SİNİR AĞLARI	40
10.1.	Biyolojik Nöronlar	40
10.2.	Yapay Sinir Ağlarının Modellemesi	41
10.3.	Yapay Sinir Ağları Çeşitleri	43
10.4.	Geri Yayımlı Öğrenme	44
11.	BULANIK MANTIK	47
11.1.	Bulanık Sistemlerin Gelişimi	47
11.2.	Bulanık Mantık Sistemlerinin Avantajları	48
11.3.	Bulanık Küme Kuramı	48
11.4.	Bulanık Sistem Nedir?	48
11.5.	Bulanık Sistem Modellemesi	49
11.5.1.	Bulanıklaştırıcı (Fuzzifier)	50
11.5.2.	Kural İşleme Ünitesi	50
11.5.3.	Durulaştırıcı	51
11.5.4.	Denetlenen Sistem	53
12.	UYARLAMALI AĞ TABANLI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ (ANFIS)	54
13.	DC SERVO MOTOR SIMULINK MODELİ	56
14.	YÖNTEM	58
15.	RÜZGAR TÜRBİNİ BLOĞU TASARIMI	59
16.	PID KONTROLÖR TASARIMI	64
17.	YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KANAT AÇISI KONTROLÖR TASARIMI	68
17.1.	YSA 11	71
17.2.	YSA 6	73
17.3.	YSA 2	75
17.4.	YSA 3	77
18.	UYARLAMALI AĞ TABANLI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ (ANFIS) İLE KONTROLÖR TASARIMI	79
19.	SONUÇLAR	82
19.1.	PID Sonuçları	82
19.2.	YSA6 Sonuçları	83
19.3.	YSA11 Sonuçları	83
19.4.	YSA2 Sonuçları	84
19.5.	YSA3 Sonuçları	85
19.6.	Anfis Sonuçları	86
20.	SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	87
	KAYNAKÇA	89
	ÖZGEÇMİŞ	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Yatay ve dikey rüzgâr türbinleri arasındaki farklar	6
Çizelge 9.1 PID kontrolör katsayı değişimi sonuçları	39
Çizelge 16.1 PID Kontrolör Katsayıları.....	64
Çizelge 16.1 PID katsayıları.....	66
Çizelge 16.2 PID karakteristik değerleri.....	67
Çizelge 17.1 Yapay Sinir Ağı Ağ Modelleri.....	70
Çizelge 17.2 Yapay Sinir Ağı Modelleri Katmanlarda Bulunan Hücre Sayıları	70



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Türkiye’de rüzgâr türbinleri ile elektrik üretilen iller	2
Şekil 1.2 Rüzgâr Türbinleri Boylarının Karşılaştırılması [10], [8].	3
Şekil 2.1 Denizde (offshore) ve karada (onshore) kurulmuş rüzgâr türbini çiftliği [16]	6
Şekil 3.1 Rüzgâr enerjisinin türbindeki yolculuğu	7
Şekil 3.2 Rüzgâr Türbini Elemanları	7
Şekil 3.3 Rüzgâr Türbini Elemanlarından Mekanik Fren [17].....	9
Şekil 3.4 5 MW Jeneratör [18]	9
Şekil 3.5 YAW Drive [19]	10
Şekil 3.6 Anemometre [21]	10
Şekil 4.1 Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör Yapısı	11
Şekil 4.2 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör Yapısı	12
Şekil 4.3 Senkron Jeneratör Yapısı.....	13
Şekil 5.1 Rüzgâr türbini yapısı [25].....	14
Şekil 5.2 Yapay Sinir ağı tabanlı türbin modellemesi [26].....	15
Şekil 5.3 Güç çıkışı [26].....	16
Şekil 5.4 Yapay sinir ağı adımları	17
Şekil 5.5 Yapay Sinir Ağı ve Türbin Modellemesi [27].....	18
Şekil 5.6 Rüzgâr türbini Matlab modellemesi [28]	19
Şekil 5.7 Rüzgâr türbini tasarımı ve kontrolörler [29].....	20
Şekil 5.8 Rüzgâr türbini ve yapay sinir ağı modellemesi [30].....	21
Şekil 5.9 Sistemin genel modellemesi [31].....	23
Şekil 5.10 Rüzgâr türbini tasarımı [32].....	24
Şekil 5.11 iki adet ANFIS tasarımı [33]	25
Şekil 5.12 Rüzgâr türbinin yapay sinir ağı tabanlı modellemesi [34]	26
Şekil 5.13 Rüzgâr türbini modellemesi ve kanat açısı [35]	27
Şekil 5.14 Rüzgâr türbini sistemi modellemesi ve bulanık kontrol [36]	28
Şekil 6.1 Rüzgâr türbini çıkış gücü karakteristiği	29
Şekil 7.1 Kanat Açısının Ayarlanması.....	31
Şekil 8.1 Rotor alanı, Kule yüksekliği ve güç çıkışı karşılaştırmaları [40]	32
Şekil 9.1 PID Kontrolör Genel Yapısı	36
Şekil 9.2 PID Kontrolör Matematiksel Gösterimi	38
Şekil 10.1 Biyolojik Sinir Hücresi [53]	41
Şekil 10.2 Matematiksel Sinir Hücresinin Modellenmesi.....	41
Şekil 10.3 Yapay Sinir Ağları Aktivasyon Fonksiyonları [54]	42
Şekil 10.4 Yapay Sinir Ağları Çeşitleri	44
Şekil 10.5 Geri yayımlı öğrenme akış şeması.....	45
Şekil 11.1 Bulanık Sistemin Genel Modeli.....	48
Şekil 11.2 Bulanık sistem modellemesi	49
Şekil 11.3 Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi [65]	52
Şekil 12.1 ANFIS Mimarisi [70]	54
Şekil 13.1 DC Motor Elektriksel Modeli	56
Şekil 13.2 DC Motor Simulink Modeli Gösterimi	57
Şekil 13.3 DC Motor Modelinin iç blokları	57

Şekil 14.1 Rüzgâr Türbini Sistemin Genel Modellenmesi.....	58
Şekil 15.1 Sistem ayrıntılı blok şeması.....	59
Şekil 15.2 Rüzgâr Türbini Bloğunun İç Yapısı.....	60
Şekil 15.3 Rüzgâr Türbini Genel Gösterimi Bloğu	61
Şekil 15.4 Rüzgâr Hızı Grafiği.....	61
Şekil 15.5 Rüzgâr Türbini İç Bloğu.....	62
Şekil 15.6 Rüzgâr Türbini Güç Katsayısı Hesaplama Bloğu İç Yapısı.....	62
Şekil 16.1 PID Kontrolör ile Rüzgâr Türbini Tasarımı Blok Gösterimi.....	64
Şekil 16.2 PID Parametreleri.....	65
Şekil 16.3 PID Kontrolör Güç Çıkışı.....	65
Şekil 16.4 PID Kontrolör 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı	66
Şekil 17.3 YSA11 Deneyinin Blok Gösterimi	71
Şekil 17.4 YSA11 Deneyinin Rüzgâr Türbini Güç Çıkışı	72
Şekil 17.5 YSA11 Kontrolör 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı.....	72
Şekil 17.6 YSA6 Deneyinin Simulink Modeli.....	73
Şekil 17.7 YSA6 Deneyinin güç çıkışı	74
Şekil 17.8 YSA6 Kontrolör 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı.....	74
Şekil 17.9 YSA2 Adlı deneyin genel gösterimi	75
Şekil 17.10 YSA2 Deneyi Güç Çıkışı.....	76
Şekil 17.11 YSA2 Kontrolör 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı.....	76
Şekil 17.12 YSA3 Deneyinin Modellemesi	77
Şekil 17.13 YSA3 Deneyinin güç çıkışı	78
Şekil 17.14 YSA3 Kontrolör 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı.....	78
Şekil 18.1 ANFIS uygulaması ara yüzü.....	79
Şekil 18.2 ANFIS tasarımın blok modellemesi.....	80
Şekil 18.3 ANFIS tasarım Güç Çıkışı.....	81
Şekil 18.4 ANFIS Kontrolör 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı.....	81
Şekil 19.1 PID Kontrolör ve YSA6 kontrolörleri 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı.....	83
Şekil 19.2 PID Kontrolör ve YSA11 kontrolörleri 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı	84
Şekil 19.3 PID Kontrolör ve YSA2 kontrolörleri 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı.....	85
Şekil 19.4 PID Kontrolör ve YSA3 kontrolörleri 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı.....	85
Şekil 19.5 PID Kontrolör ve ANFIS kontrolörleri 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı	86

SİMGELER ve KISALTMALAR

A	Rotor süpürme alanı	(m ²)
AA	Alternatif akım	(A)
ANFIS	Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi	(-)
BP	Geri Beslemeli Ağ	(-)
C _p	Güç katsayısı	(-)
D	Türevsel	(-)
DA	Doğru akım	(A)
DFIG	Çift beslemeli indüksiyon jeneratör	(-)
e	hata sinyali	(-)
f	Yapay sinir ağı aktivasyon fonksiyonu	(-)
GWEC	Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi	(-)
HAWT	Yatay eksenli rüzgâr türbini	(-)
I	İntegral	(-)
IDPC	Zeki dijital kanat açısı kontrolörü	(-)
MLP	Çok Katmanlı Algılayıcı	(-)
MPPT	Maksimum Güç Noktası Takipçisi	(-)
NN	Yapay sinir ağı	(-)
OLA	Sürekli öğrenme tahmincisi	(-)
P	Oransal	(-)
P _T	Rüzgâr türbini çıkış gücü	(W)
P _r	Referans güç	(W)
PMSG	Sabit mıknatıslı senkron jeneratör	(-)
Q	Yapay sinir ağı eşik değeri	(-)
r _T	Rotor çapı	(m)
RBF	Radyal baz tabanlı ağ	(-)
RES	Rüzgâr türbini	(-)
SG	Senkron jeneratör	(-)
SCIG	Sincap kafesli indüksiyon jeneratör	(-)
u	kontrol sinyali	(-)
VAWT	Dikey eksenli rüzgâr türbini	(-)

w_n	yapay sinir ağı ağırlıkları	(-)
w_T	Kanat dönüş hızı	(rpm)
WRSG	Rotor sargılı senkron jeneratör	(-)
x_n	Yapay sinir ağı hücresi giriş değeri	(-)
y	Yapay sinir ağı çıkış sinyali	(-)
YSA	Yapay sinir ağı	(-)
β	Kanat Açısı	($^\circ$)
λ	Uç-hız oranı	(-)
ρ	Hava yoğunluğu	(kg/m ³)
Σ	toplam	(-)
$^\circ$	Derece	($^\circ$)



1. RÜZGAR ENERJİSİ HAKKINDA BİLGİLER

1.1. Rüzgâr Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Rüzgâr enerjisinin insanoğlu tarafından kullanılması çok eskilere dayanır. İnsanlar M.Ö. 3100 yıllarında rüzgâr enerjisini kullanmak için küçük yelkenli sandallar yaptılar [1]. Su taşımak ve birkaç çeşit tahıl öğütmek için M.S. 10. yüzyılda rüzgâr türbinlerini inşa ettiler. Bu durumda ilk rüzgâr türbinleri su taşımak ve tahıl öğütmek için değirmenlerde kullanılmıştır [2].

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerine ilk örnek, İran-Afgan sınırında bulunmuştur ve M.Ö. 200 yıllarına kadar dayandırılmaktadır. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri ise Hollanda ve Akdeniz çevresinde açığa çıkarılmış ve M.S. 1300-1875 yılları arasında tarihlendirilmişlerdir.

Sonraki yıllarda elektrik üretimi için kullanılmışlardır. Elektrik üreten ilk büyük rüzgâr türbini 1888 yılında 12 kW gücünde ABD'nin Ohio bölgesinde kurulmuştur. 1. Dünya savaşının sonlarına yaklaşılırken ise Danimarka'da rüzgâr türbinlerinin geniş alanlara yayıldığı görülmüştür. Daha sonraki yıllarda tek kanatlı uçaklardan ilham alınarak daha yüksek güçte rüzgâr türbinlerinin tasarlanabileceği ABD, İngiltere, Almanya ve Danimarka'nın çalışmalarıyla gösterilmiştir [3].

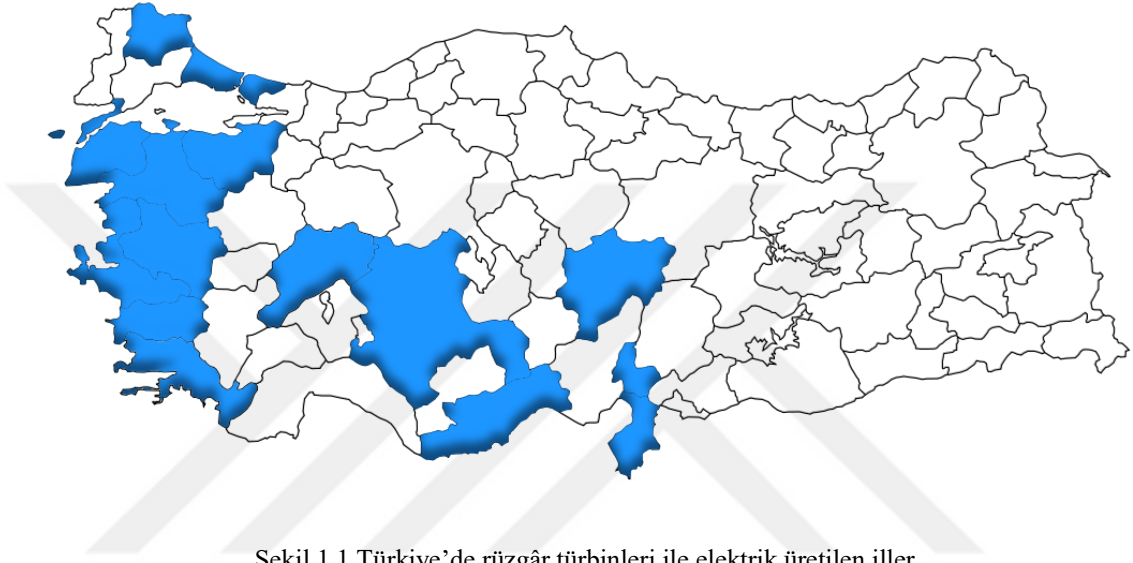
Son yıllarda rüzgâr enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi kapasitesi hızla artmıştır. 1980'lerde Amerika'da 11,603 megavat (MW) iken 2006 yılına geldiğimizde yaklaşık 60000 MW olmuştur. Ancak bu hızlı artışa rağmen Amerika Birleşik Devletleri elektrik tüketim oranlarına genel olarak bakıldığında rüzgâr enerjisi kullanımı %1 oranında kalmaktadır [2].

Fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar karşılaştırıldığında, elektriğin rüzgârdan elde edilmesi çevreye verilen zararı azaltmaktadır. Rüzgâr enerjisi atmosferik ve termal kirlilikler üretmez böylelikle de hükümetler, organizasyonlar ve bireyler için çekici olmaktadır. Ancak rüzgâr türbinleri çevreye zarar da verebilir. Bunlar zararlar kuşların veya yarasaların çarpması sonucu ölmeleridir [2].

1.2. Günümüzde Rüzgâr Enerjisi

1998 yılında İzmir’de 1,5 MW kurulu güce sahip Germiyan RES ile başlayan Türkiye’nin rüzgârdan elektrik üretimi, son dönemde yenilenebilir enerji santrallerine verilen teşviklerin etkisiyle hızlanarak devsem etmektedir.

2021 yılı ağustos ayında ise Türkiye’nin rüzgâr enerjisi kurulu gücü 10 GW’ı aşmıştır [4].



Şekil 1.1 Türkiye’de rüzgâr türbinleri ile elektrik üretilen iller

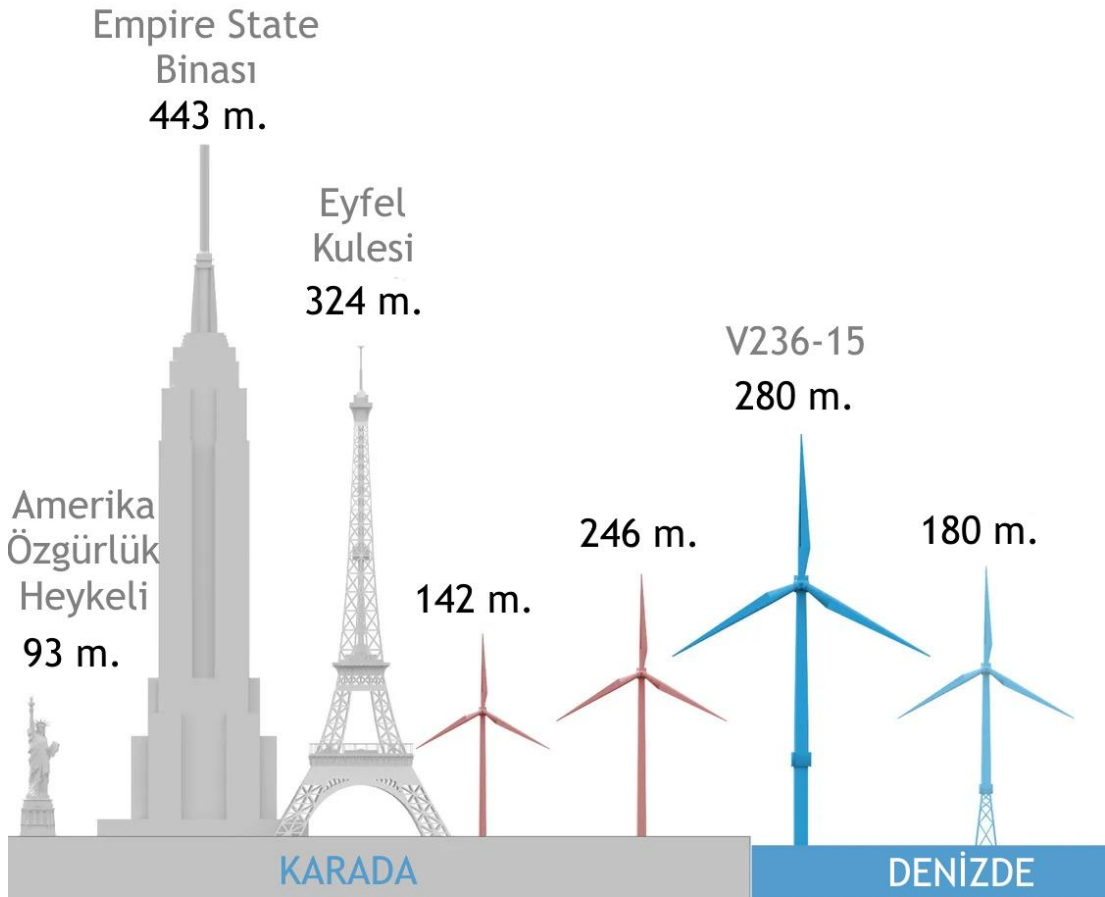
Şekil 1.1’de Türkiye’de rüzgâr türbini ile elektrik üretilen iller gösterilmiştir. Rüzgâr enerjisinde il bazında en yüksek kapasite yaklaşık 1700 megavatla İzmir’de bulunurken, bunu 1300 megavatla Balıkesir, yaklaşık 850 megavatla Çanakkale, 750 megavatla Manisa ve 420 megavatla İstanbul izlemektedir [5].

2021 yılı ilk yarısında devreye alınan 1.280 MW ile rüzgâr kurulu gücü toplam 10.585 MW’a ulaştı. 2021 yılı ilk yarısında rüzgârdan elde edilen elektrik toplamı 13 milyon 751 bin 842 MWh erişirken bu miktar Türkiye’de üretilen toplam elektriğin yüzde 9.22’sini oluşturmaktadır. Ocak ayında ise Türkiye’de elektriğin %10.98’i rüzgârdan karşılandı. Türkiye’de halen 926.83 MW’lık 24 rüzgâr santralının inşası devam etmektedir [6].

Dünyada, 2020’de 2019 yılına göre %53 büyüyerek yeni kurulu rüzgâr gücü 90 GW’ı geçmiştir. Bu kurulu gücün 86.9 GW’ı karaya kurulan rüzgâr türbinlerinden geri kalanı da deniz üstü rüzgâr türbinlerinden elde edilmektedir. Toplam kurulu gücü 743 GW

olmuştur bu oran 2019 yılına göre %14 daha fazladır. Ayrıca 2020’de yeni kurulan rüzgâr türbinlerinin çoğunu %56 ile Çin, %18 ile Amerika, %3 ile Brezilya, %2 ile Hollanda, %2 ile Almanya ve %19 ile diğer ülkeler oluşturmuştur [7].

Dünyanın en yüksek rüzgâr türbini, toplam yüksekliği 246.5 m. ile Stuttgart yakınlarındaki Almanya'nın Gaildorf kasabasında bulunuyor. Ayrıca son olarak İskoçya’da, 260 m (850 ft) yüksekliğe sahip türbinleri olan bir rüzgar çiftliği inşa edileceği öne sürülmüştür [8]. Bu yükseklik değeri İskoçya'nın en yüksek binası olan Glasgow Kulesi'nin iki katı yüksekliğindedir. Şekil 1.2’de rüzgâr türbini yükseklik karşılaştırmaları gösterilmiştir. Anlaşılacağı üzere deniz üzerine kurulan rüzgar türbini boyutları karada kurulan rüzgar türbini boyutlarını geçmektedir [9].



Şekil 1.2 Rüzgâr Türbinleri Boylarının Karşılaştırılması [10], [8].

1.3.Rüzgâr Enerjisinin Geleceği

Rüzgâr enerjisi iklim krizi ile savaşmada kritik öneme sahiptir. Ancak her rüzgâr türbini çok sayıda petrokimya ve fosil yakıt enerjisini bünyesinde barındırır. Bu da demektir ki rüzgâr enerjisi fosil yakıtlardan tamamen bağımsız değildir [11].

2025 yılına kadar bakıldığında küresel rüzgâr enerjisi pazarının her yıl ortalama %4 büyümesi bekleniyor. 2025 yılına kadar her yıl ortalama 94 GW yeni kurulum olacağı varsayılıyor [12].

Küresel ısınmaya engel olmak maksadıyla yenilenebilir enerji yatırımlarında artış beklentileri devam etmektedir. Avrupa Birliği, rüzgâr enerjisini, 2030 yılına kadar karbon emilim hedefi olan %20-30 azaltma hedefine ulaşmak için kullanabilir. GWEC'in RES'lere dair beklentileri, mevcut durumdaki RES kapasitesine 2024 yılına kadar yeni 48 GW kapasite ekleneceği ve 2025-2030 yılları arasında ise ilave 157 GW kurulu güç yatırımının yapılacağı yönündedir [4].

1.4. Rüzgâr Enerjisinin Kaynağı

Rüzgâr, hareket halindeki bir atmosferik olaydır. Hava hareketinin hızı rüzgârın gücünü tanımlar ve rüzgârdaki enerji miktarı ile doğrudan ilişkilidir.

Güneş'ten gelen elektromanyetik radyasyon, Dünya'nın yüzeyini eşit olmayan bir şekilde ısıtır. Güneş ışınlarının Dünya'ya geliş açısından dolayı Ekvator ve çevresi daha fazla ısınır. Kutuplarda daha az ısınır. Hatta topraklı zeminler, kayalar, su ve bitkiler havayı farklı ölçülerde ısıtır. Bu eşit olmayan ısıtma, konveksiyonel süreçlerle, dünya'nın dönüşü ile ayarlanan hava hareketine dönüştürülür. Konvektif süreçler, hidrostatik dengenin bozulmasıdır, aksi takdirde durgun hava kütleleri yer değiştirir ve sıcaklık farklılıklarından dolayı hava yoğunluğundaki ve kaldırma kuvvetindeki değişikliklerin neden olduğu kuvvetlere tepki olarak hareket eder. Hava, yüksekten düşük basınçlı bölgelere doğru itilir, bu da Dünya'nın dönüşü nedeniyle sürtünme ve atalet kuvvetlerini dengeler. Bu rüzgârlar, mekânsal ölçeklerine ve fiziksel üretim mekanizmalarına göre kategorize edilebilir [13].

2. RÜZGAR TÜRBİNLERİ ÇEŞİTLERİ ([14])

Rüzgâr türbinlerinin türlerine ayrılması çeşitli yollardan yapılabilir. Şebekeye bağlı olup olmadığı, karalarda mı denizlerde mi kurulduğu, çıkış güçleri veya dönüş yönleri düşünülerek çeşitli ayrımlara tabii tutulabilir .

2.1. Küçük ve Büyük Rüzgâr Türbinleri

Küçük rüzgâr türbinleri genellikle 300 kW ve altı türbinlerdir. Büyük rüzgâr türbinleri ise tam tersi 300 kW ve üzeri güç üreten türbinlerdir.

Evlerde, çiftliklerde ve iş yerlerinde enerji tüketimine uygun küçük bir rüzgâr türbini kullanılıyor olabilir. Şebeke elektriğinin ulaşımı zor veya pahalı olduğu alanlarda destekleyici yani güneş panelleri veya bir dizel jeneratörle hibrit bir şekilde kullanılıyor olabilir.

Öte yandan, rüzgâr türbinlerinin üretim kapasiteleri sürekli artmaktadır. 1980'lerde 50 kW ve 15 metre rotor çapına sahip olan türbinler artık 15 MW gücünde ve rotor çapı ise 280 metre seviyelerine kadar çıkmıştır. 2024 yılı itibariyle seri üretime geçilmesi planlanmıştır [15].

2.2. Kurulum Yerlerine Göre Rüzgâr Türbinleri

Kurulum yerlerine göre rüzgâr türbinlerini onshore ve offshore olarak ikiye ayırabiliriz. Onshore rüzgâr türbinleri kara üzerine kurulur offshore ise denizler üzerine kurulur. Onshore rüzgâr türbinlerine karada kurulan rüzgâr türbinleri, offshore rüzgâr türbinlerine denizde kurulan rüzgâr türbini denir. Çeşitli amaçlarla bu iki tip rüzgâr türbinlerinden biri seçilebilir. Türbinlerin bu biçimde ikiye ayrılmasındaki ana sebep arazidir. Arazi yetersizliği olan ülkeler ve arazi yerleşimi çok dağınık ve zor olan yerleşimlerde rüzgâr türbinlerini deniz üzerine kurmak gerekebilir. Böylelikle elektrik enerjisinin taşınması ve rüzgâr türbini kurulumu maliyeti azaltılabilir. Dünyada en çok onshore türbinler kurulmaktadır. 2020 yılında toplam 6,1 GW kapasitede RES kurulumu yapılarak dünyadaki toplam kurulu güç yaklaşık 35,2 GW

seviyesine ulaşmıştır. Şekil 2.1’de denizde ve karada kurulan rüzgâr türbini çiftliği görülmektedir.



Şekil 2.1 Denizde (offshore) ve karada (onshore) kurulmuş rüzgâr türbini çiftliği [16]

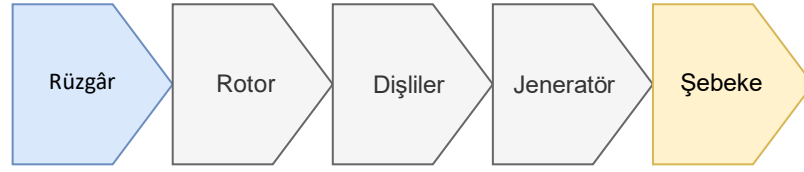
2.3. Yapılarına Göre Rüzgâr Türbinleri

Yapılarına göre rüzgâr türbinleri yatay (HAWT) veya dikey rüzgâr türbinleri (VAWT) olarak ikiye ayrılabilir. Yatay ve dikey rüzgâr türbinleri arasındaki farklar, avantajlar ve dezavantajlar Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

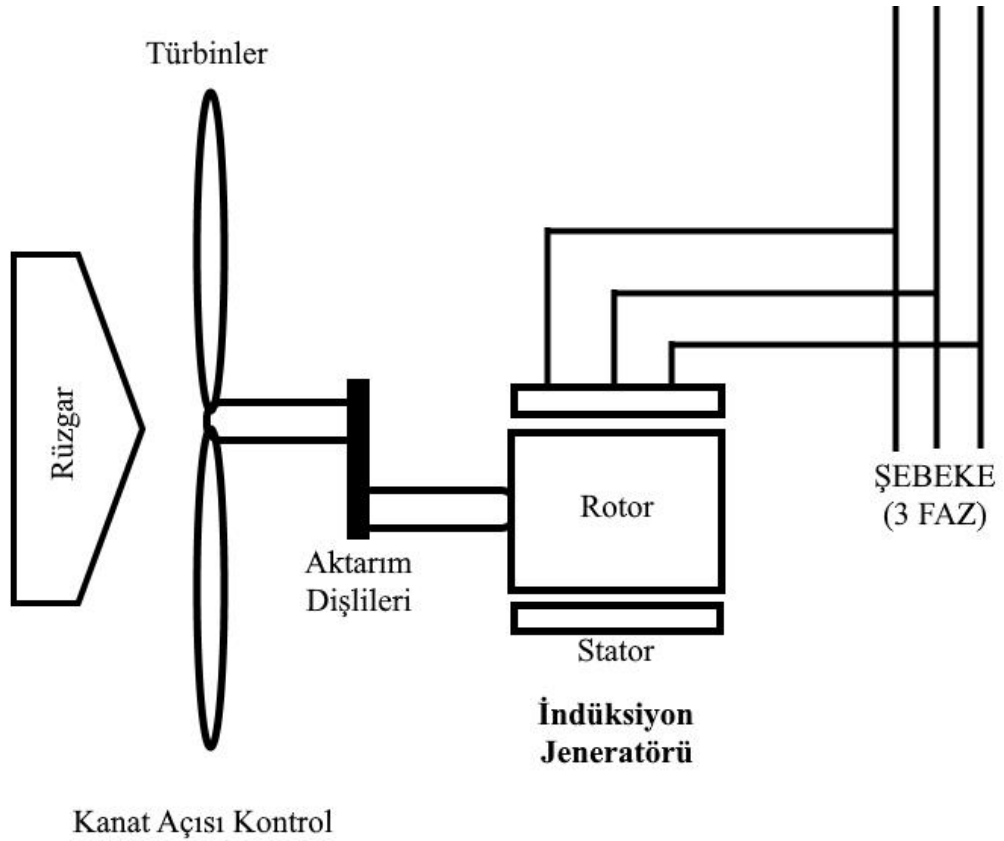
Çizelge 1.1. Yatay ve dikey rüzgâr türbinleri arasındaki farklar

TÜRBİN TİPİ	AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
HAWT	Yüksek enerji dönüşümü Yüksek kuleler ile yüksek hızlı rüzgârla çalışabilmesi Kanat açısı kontrolü ile yüksek hızlı rüzgâr şartlarında çalışma	Yüksek kurulum maliyeti. Kuleden yere daha uzun kablo Yaw kontrol gerekliliği
VAWT	Daha düşük kurulum ve bakım maliyetleri. Rüzgâr yönünden bağımsız çalışma Çatılara kurulabilmesi	Düşük enerji dönüşümü Yüksek tork akışları ve mekanik sarsıntılar Yüksek rüzgâr hızlarında daha az kontrol opsiyonu

3. TÜRİN ELEMANLARI



Şekil 3.1 Rüzgâr enerjisinin türbindeki yolculuğu



Şekil 3.2 Rüzgâr Türbini Elemanları

Rüzgâr, türbinlerin rotorlarını hareket ettirir dönen rotorlar çeşitli mekanizmalar yardımıyla jeneratöre hareket olarak aktarılır. Jeneratör çalıştırılarak elektrik üretimi sağlanmış olur. Rüzgârdan elektrik üretmek için böyle bir takım mekanizmaya ihtiyaç vardır. Bu etkileşim sıralı olarak şekil 3.1 ve şekil 3.2’de gösterilmiştir.

3.1. Kanatlar

Türbin kanatları en dikkat çeken görünür parçadır. Rüzgârı yakaladığı için çok önemli bir görevi vardır. Rotor olarak da isimlendirilebilir. Modern rotorlar genellikle alüminyum, fiberglas veya karbon-fiber kompoze malzemelerle yapılabilir. Bu tür malzemelerin seçilmesinin ana nedeni hem hafif hem de dayanıklı olmalarıdır.

Her ne kadar tek kanatlı ve iki kanatlı rüzgâr türbinleri bulunsa da yüksek rüzgâr hızlı türbinlerde 3 kanat bir standart haline geldi denilebilir.

3.2. Pitch Mekanizması

Diğer adıyla kanat açısı mekanizması da denilebilir. Kanat açısını ayarlayan mekanizmadır. Rüzgâra göre kanatların atak açısını ayarlamaktadır. Bu çalışmada da rüzgâr türbini kanat açısı kontrol edilmesi amaçlanmıştır.

Her bir kanat tek tek kontrol edilebilir. Bu da her kanatta bir motor ve kontrolör olabileceği anlamına gelir. Kanat açısı kontrolü çıkış gücünün elde edilmesi açısından bir esneklik sağlar. Kanat açıları genellikle 20-25 derecelere kadar çıkabilir ve 0 derecenin altına inmemektedir.

Pitch mekanizması hidrolik veya elektrik aksanlarla kontrol edilebilir. Elektrik ile çalışan kontrolörler ise günümüzde daha yaygındır.

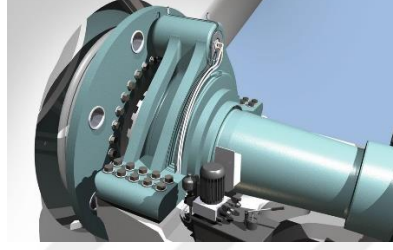
3.3. Vites Kutusu

Rüzgâr türbinlerinin rotorunun gelen kuvvetle dönmeleri, türbinin nominal jeneratör dönüşüne (rpm) göre çok daha yavaş kalmaktadır. Vitesler, dönüşüm oranı ile yüksek hız dönüşümü ve düşük hız rotor oranlarını ayarlar.

Vitesler, duyulabilir gürültüler üretir. Verimliliği %95-98 arasında değişmektedir. Rüzgâr türbinlerindeki maliyetin ana kısmını oluştururlar.

3.4. Rotor mekanik freni

Mekanik fren normalde vites ve jeneratör arasındaki yüksek hız şaftında bulunur. Bazı türbinlerde düşük hız şaftında olduğu da olur. Yüksek hız şaftında olmasının avantajları vardır. Rotor mekanik freni şekil 3.3'te gösterildiği gibidir ve genellikle yüksek hız durumlarında türbini durdurmak için kullanılır.



Şekil 3.3 Rüzgâr Türbini Elemanlarından Mekanik Fren [17]

3.5. Jeneratör

Rotorlardaki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren cihazdır. Rüzgâr türbinlerinde bir jeneratör bulunur. Çeşitli jeneratör tipleri elektrik üretiminde rüzgâr türbinlerinde kullanılabilir. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan jeneratör tipleri ile ilgili daha ayrıntılı olarak Bölüm 4 Jeneratörler başlığı altında verilmiştir. Örnek bir jeneratör şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 5 MW Jeneratör [18]

3.6. Sapma Sürücüsü

Sapma Sürücüsünün ana amacı yakalanan rüzgâr enerjisini maksimuma çıkartmaktır. Bunu da türbini rüzgârın geliş yönüne çevirerek yapar. Birçok parçadan oluşabilir. Eski rüzgâr türbinlerinde güç düzenlemesi için de kullanılmıştır ama günümüzde kullanılmamaktadır. Sapma Sürücüsü mekanik stresi azaltarak türbin ömrünü uzatmaktadır. Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 YAW Drive [19]

3.7. Kule

Kule türbini taşıyan silindirik borudur. Çoğu kule çelik malzemeden imal edilir. Rotor çapı ve çıkış gücü ile kule boyu doğru orantılıdır.

3.8. Anemometre

Anemometre rüzgâr hızını ölçen sensördür. Kendi içinde 3 tipe ayrılmaktadır. Bunlar kepçeli, ultrasonik ve kanatlı tipleridir. Rüzgâr ölçümlerinde anemometre seçimi verimli bir ölçümün yapılması açısından önemlidir [20]. Örnek bir anemometre şekil 3.6'da gösterilmiştir.



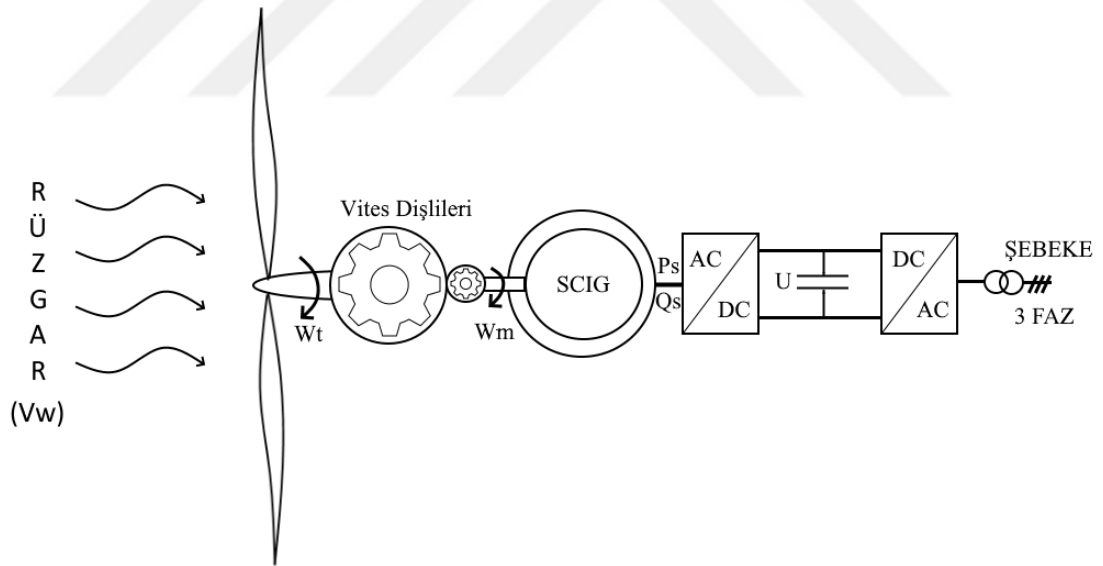
Şekil 3.6 Anemometre [21]

4. JENERATÖRLER

Rüzgâr türbinlerinde yıllar boyunca çeşitli jeneratörler kullanılmıştır. Bunlar sincap kafesli indüksiyon jeneratörü (SCIG), çift beslemeli indüksiyon jeneratörü (DFIG) ve senkron jeneratör (SG) olarak verilebilir.

4.1. Sincap Kafesli İndüksiyon Jeneratörü (SCIG)

SCIG basit ve sağlam yapılıdır. Görece olarak daha az maliyetlidir. Hem üretim maliyeti düşüktür hem de bakım maliyetleri azdır. Geleneksel olanlar, şebekeye bağlı türbinler günümüzde bulunmaktadır. Tüm bu geleneksel türbinler sabit hızlı SCIG kullanmaktadır. İkili operasyon bölgesine sahip diğer bir deyişle ikili çalışma hızına sahip SCIG jeneratöre sahip RES de bulunabilir. Aynı zamanda SCIG, değişken hızlı RES'lerde de kullanılmaktadır. SCIG genel yapısı şekil 4.1'de gösterilmiştir. Sincap kafesli asenkron makine bir AC sisteme doğrudan bağlanıp sabit hızda işletilebileceği gibi güç elektroniği üniteleri ile birlikte değişken hızlarda da işletilebilir [22].

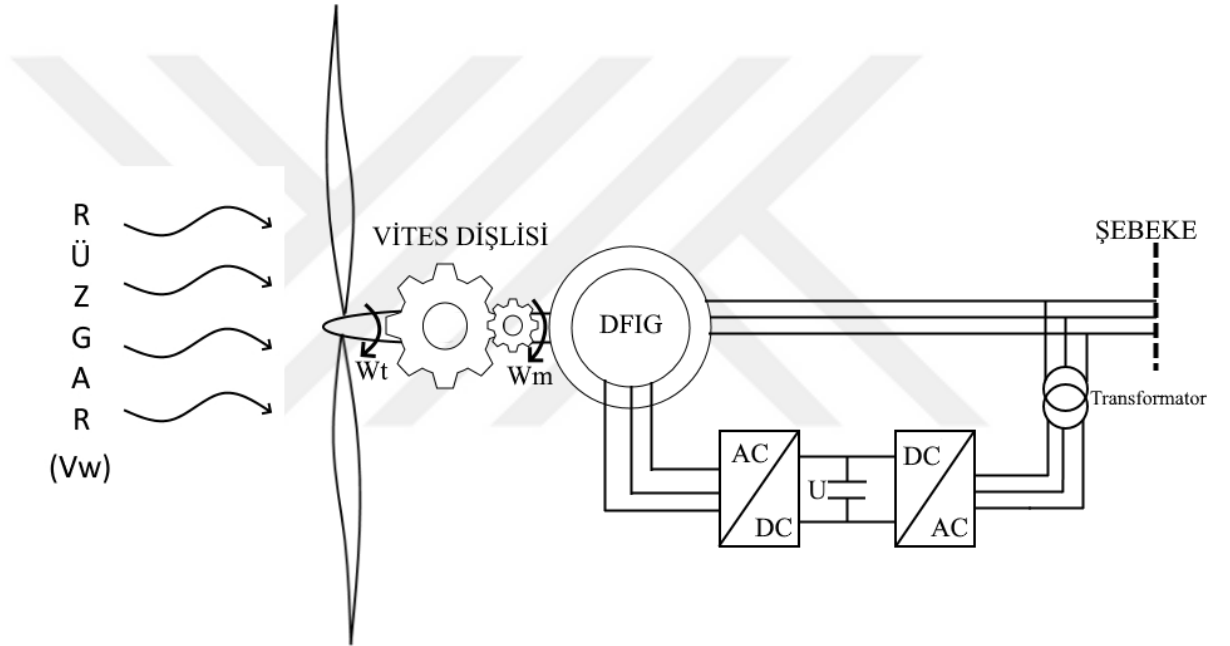


Şekil 4.1 Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör Yapısı

4.2. Çift Beslemeli İndüksiyon Jeneratörü (DFIG)

DFIG jeneratörün rüzgâr enerjisi endüstrisinde sağlam bir yeri vardır. Bu jeneratörün statoru doğrudan şebekeye bağlıdır. DFIG tipik olarak senkron hızdan %30 aşağıda

veya yukarıda çalışır. Rüzgârın değişken hızlarına uygundur. Azaltılmış olan hacmi sayesinde daha az yer kaplar ve daha ucuzdur dolayısıyla günümüz piyasalarında popüler konumdadır. DFIG genel yapısı şekil 4.2’de gösterilmiştir. Doğrudan şebekeye bağlı çalışabilir. Rotorda bir frekans dönüştürücü kullanılır. Makine tarafı dönüştürücü ile, darbeli sinüzoidal voltajlar ve değişken frekans ve genlikteki akımlar, ara voltaj devresinden rotor devresine değiştirilir. Alan sargılarına ayarlanabilir frekanslı AC gücü besleyerek manyetik alanın dönmesi sağlanabilir. Bu durum rüzgar türbinlerinde avantajlı bir konuma gelmelerini sağlamaktadır.

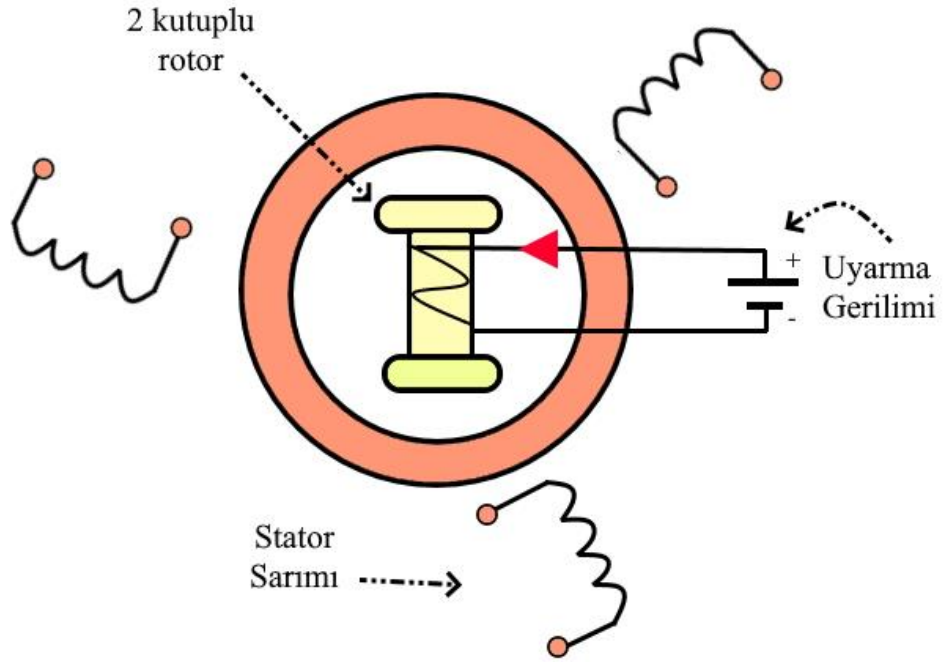


Şekil 4.2 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör Yapısı

4.3. Senkron Jeneratör (SG)

Senkron jeneratörler rüzgâr türbinlerinde çokça kullanılmaktadır. Kullanıldığı rüzgâr türbinlerinin güçleri birkaç kW’tan birkaç MW’a kadar değişmektedir [23]. Senkron jeneratörlerde rotor sargısına bir doğru akım (DA) uygulanır ve bu akım bir rotor manyetik alanı oluşturur. Bu sırada jeneratörün rotoru rüzgâr kuvvetiyle döndürülür. Böylece dönen bir manyetik alan üretilmiş olur. Bu dönen manyetik alan jeneratörün

stator sargılarında üç fazlı gerilimler indükler [24]. Senkron jeneratör genel yapısı şekil 4.3'te gösterilmiştir.

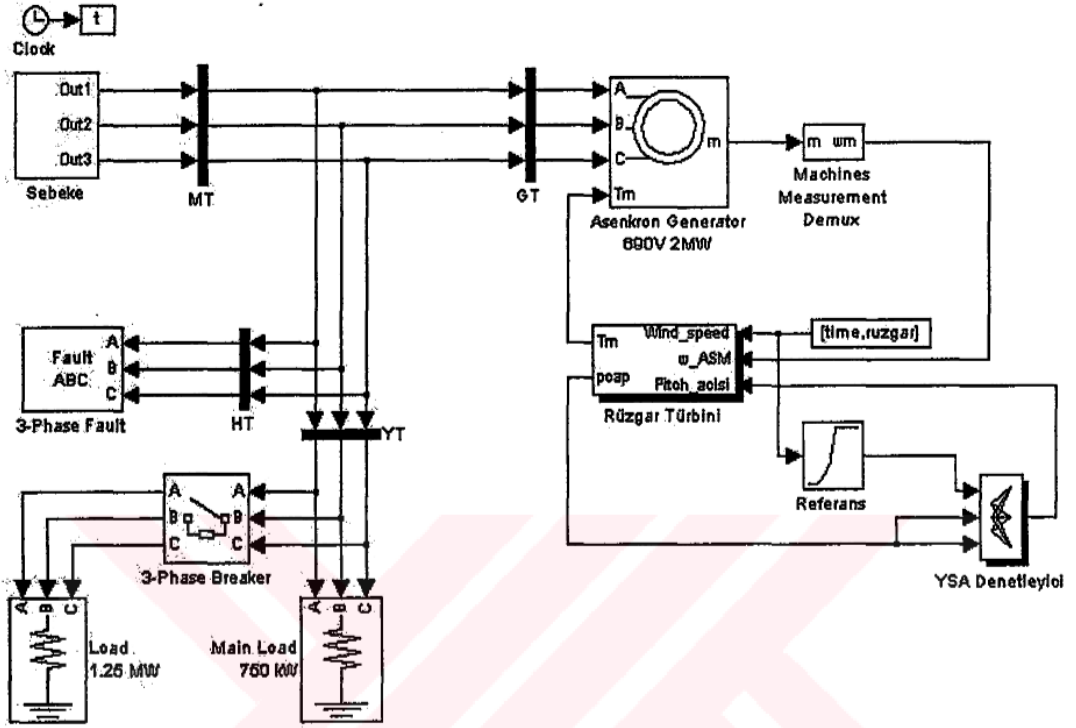


Şekil 4.3 Senkron Jeneratör Yapısı

Senkron jeneratörler 2 kısma ayrılabilir. Rotor sargılı senkron jeneratör (WRSG) ve sabit mıknatıs senkron jeneratör (PMSG).

5. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Rüzgâr türbinlerinin yapay sinir ağları ile kontrolü geleneksel yöntemlere göre daha azdır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında Yapay Sinir Ağları ile oluşturulan kontrolörler geleneksel yöntemlere göre oluşturulan kontrolörlere göre daha başarılı olmuştur. Kanat açısının kontrolü ile ilgili birçok makale incelenmiş olup bunlara değinilmiştir.



Şekil 5.1 Rüzgâr türbini yapısı [25]

Ahmet Serdar YILMAZ danışmanlığında 2005 yılında Zafer ÖZER'in yaptığı çalışmada [25] MATLAB/Simulink kullanılarak bilgisayar ortamında simüle edilen rüzgâr türbini genel şeması şekil 5.1 ile gösterilmiştir. Referans bloğu Nordex firmasının N90 modeli rüzgâr türbininin kataloğunda yer alan ölçülmüş değerler göz önüne alınarak oluşturulmuş bir bloktur. Rüzgâr hızı 14 m/s oluncaya dek türbinin rüzgârda kanat açısı 0° olarak kalmaktadır. Rüzgâr hızı 14 m/s'yi geçtikten sonra yapay sinir ağı denetleyicisi türbinin çıkış gücünü nominal güçte sabitlemek için referans ile türbin çıkışını karşılaştırıp elde edilen hata ile referanstaki gücü yakalayabilmek için

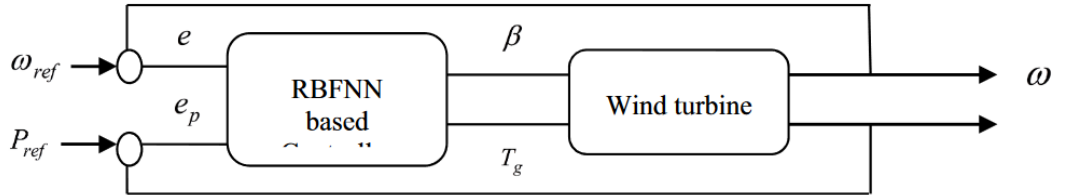
kanat açısını ayarlamaktadır. Türbin bloğunda üç adet giriş vardır bunlar rüzgâr hızı, kanat açısı ve rotor hızıdır.

Yapay sinir ağı denetleyicisi iki girişli bir çıkışlıdır. Girişler denetlenen sistem çıkışı ve aynı sistemin bir önceki çıkışıdır. Denetleyici on-line olarak sürekli eğitilmekte ve sistemin denetimi için uygun açı değerini çıkış olarak vermektedir. Gizli katmanda beş adet nöron vardır. Gizli katmanda doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonu, çıkış katmanında ise doğrusal aktivasyon fonksiyonu (purelin) kullanılmıştır. YSA'ya ait parametre güncelleştirilmesi ise bu hata değerine göre yapılmaktadır.

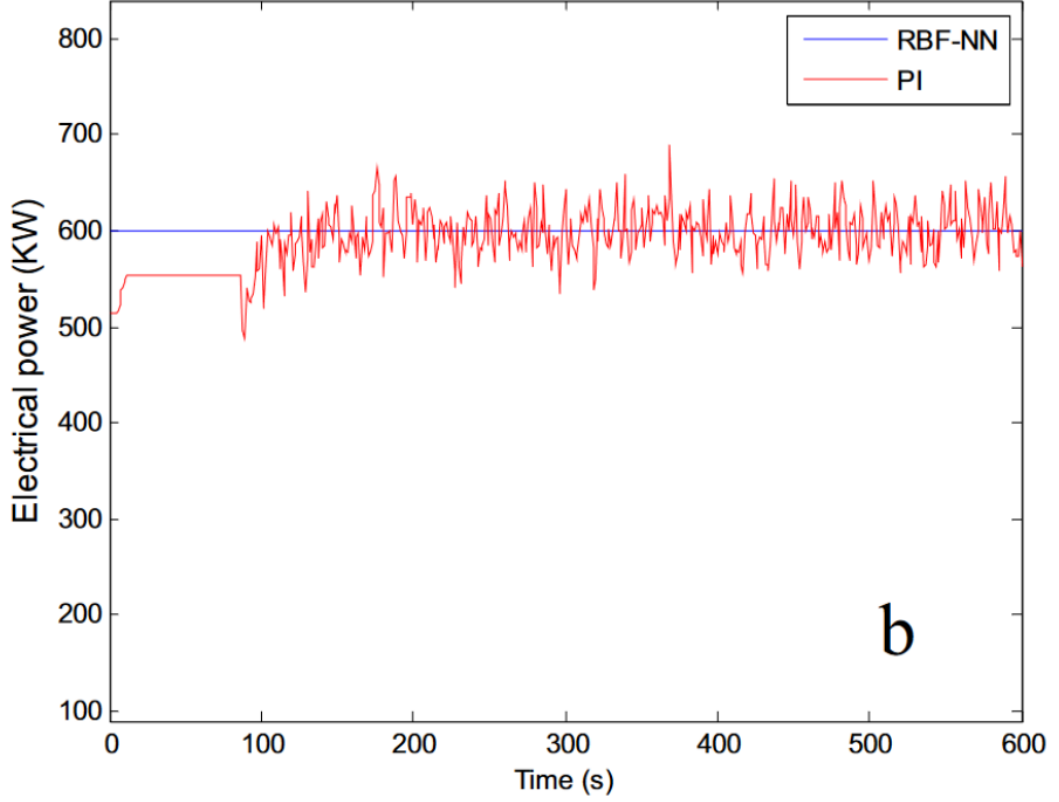
Değişken kademeli artan sabit rüzgâr hızlarında yük alma ve yük atma simülasyonu yapılmıştır. Rüzgâr hızı yaklaşık 10 ile 19 m/s hızları arasındadır. Kademeli artan rüzgâr hızında kanat açısı ayarlanarak çıkış değerleri elde edilmiştir.

İncelenen sistemde istenen güç ile gerçek güç arasındaki hata kullanılarak açı değişim işareti elde edilmiştir. Sonuç olarak türbinin çıkış gücü rüzgâr hızının nominal değerlerin altında olduğu bölgeler hariç sabit kalmıştır. Test ettiğimiz sistemde yapay sinir ağı rüzgâr hızındaki değişiklikleri izleyerek uygun kanat açısı ayarlaması yapmaktadır. Bu yöntem değişken hızlı asenkron jeneratörde güç kontrolü sağlamaktadır.

Sonuçta güç değerlerine bakıldığında yapay sinir ağı ile oluşturulan bu sistem rüzgâr hızının dengesizliğinden de kaynaklı olarak osilasyonlu olduğu ve aşmanın yapılan sisteme nazaran daha fazla olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 5.2 Yapay Sinir ağı tabanlı türbin modellemesi [26]



Şekil 5.3 Güç çıkışı [26]

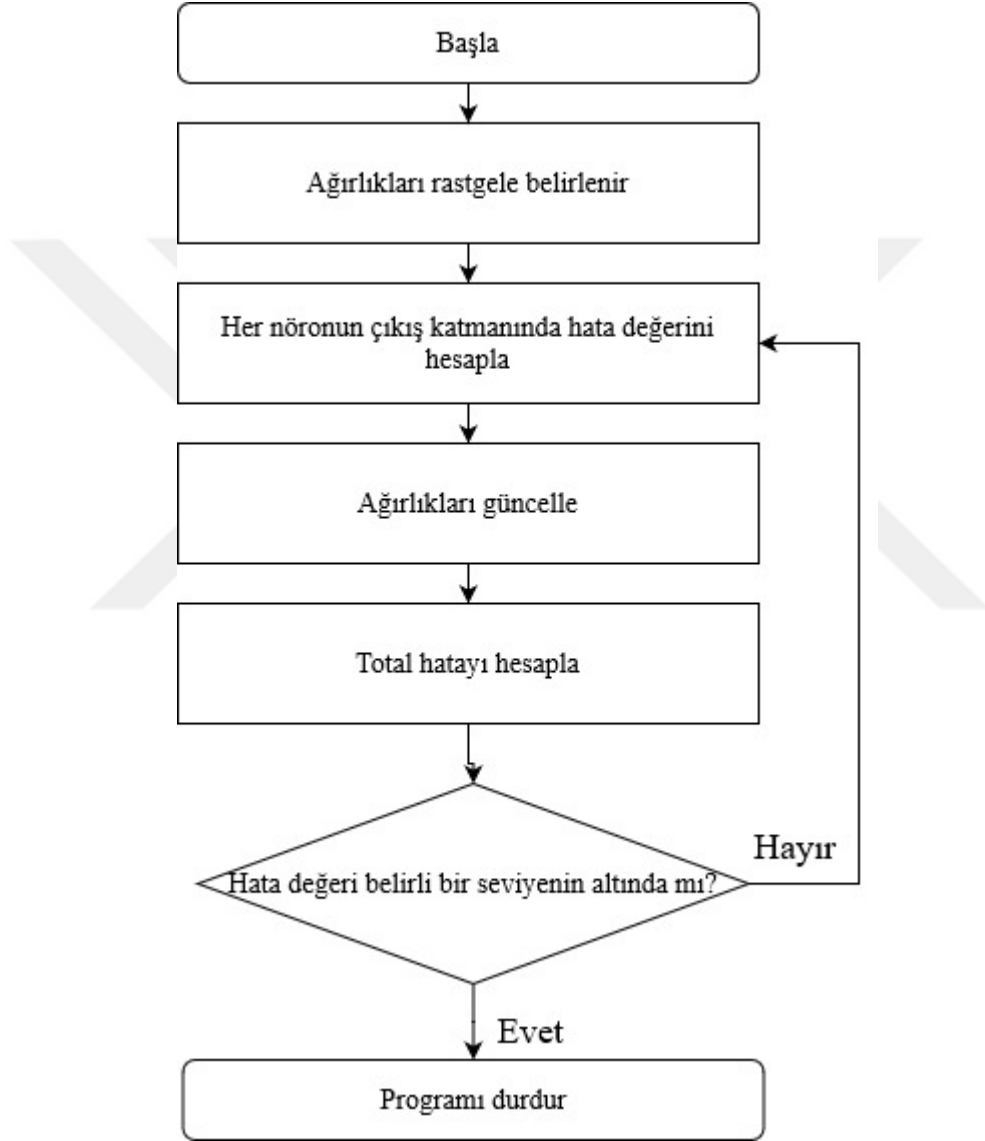
2016 yılında Elkabira ve arkadaşları [26] 600 kW rüzgâr türbini kontrolü için yapay sinir ağlarından yararlanmışlardır. Kullanılan yapay sinir ağı radyal baz yapay sinir ağıdır. MATLAB/Simulink kullanılarak modellenmiştir. Modellenen sistemin genel yapısı ve elektriksel çıkış gücü sırasıyla şekil 5.2 ve şekil 5.3 ile gösterilmiştir.

Rüzgâr türbini sistemini etkileyen büyük bozucu girişlere karşı önerilen kontrolör kontrol performansını geliştirmesi bakımından etkili bulunmuştur. Geleneksel oransal integral kontrolöre karşı daha etkin olduğuna karar verilmiştir.

Rüzgâr hızının belirli bir rüzgâr hızı değerinden düşük olduğu durumda güç katsayısını maksimize ederek tork kontrolü yapılmaktadır. Rüzgâr hızının belirli bir rüzgâr hızı değerinden büyük olduğu durumlarda genellikle modern türbinlerde olduğu gibi kanat açısı kontrolü yapılmaktadır.

Kullanılan yapay sinir ağı radyal baz tabanlı sinir ağıdır. Doğrusal olmayan sistemler için RBF tabanlı kontrol, kompakt bir küme üzerindeki herhangi bir doğrusal olmayan fonksiyonun bir RBF tarafından keyfi kesinliğe yaklaştırılmasına dayanır. Birçok

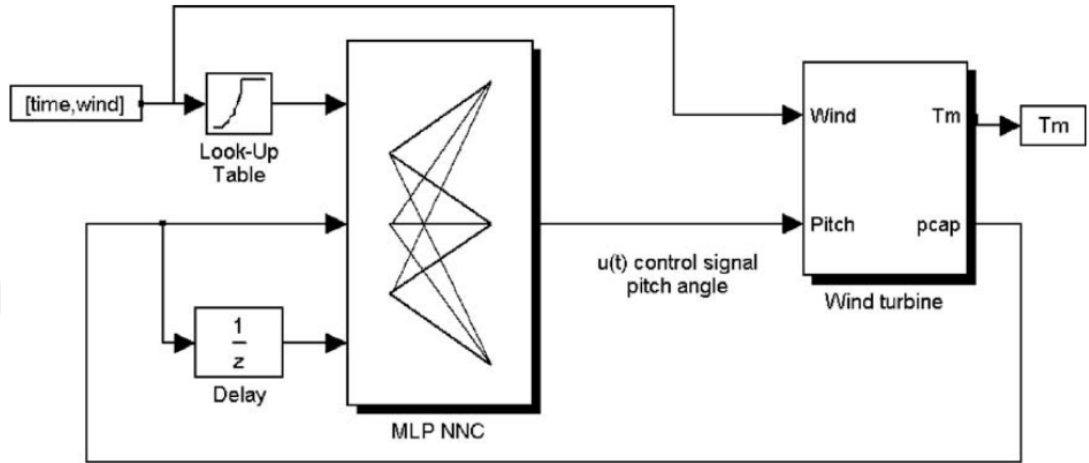
klasik kontrol sisteminde sistemsel bazı bilgiler bir gurup matematiksel ve diferansiyel eşitliklere dayanır. Ancak bu matematiksel bilgilerle kompleks sistemler tasarlamak zor olabilir. Bu çalışmada RBF kullanılarak sistemin matematiksel modeline duyulan ihtiyaç ortadan kaldırılmıştır. Bu çalışmada aşağıdaki yapay sinir ağı adımları uygulanmıştır ve şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Yapay sinir ağı adımları

Giriş katmanı elektriksel güç hatası içindir. Bir adet gizli katmanda 25 nöron bulunur. Gizli katmanın aktivasyon fonksiyonu radyal baz fonksiyonudur. Eğitim algoritması gradyan azalıştır. Öğrenim katsayısı 0.1'dir. Ayrıca rotor çapı 43.3 metredir.

Değişken rüzgâr hızı girişine sahip bu sistemde jeneratör torku çok stabil olup jeneratör çıkış gücü 600 kW seviyesinde tutturulabilmiştir. PI kontrolöre göre salınımları daha azdır. Ancak bu sistemin salınımları bizim sonuçlarımıza göre daha fazladır.



Şekil 5.5 Yapay Sinir Ağı ve Türbin Modellemesi [27]

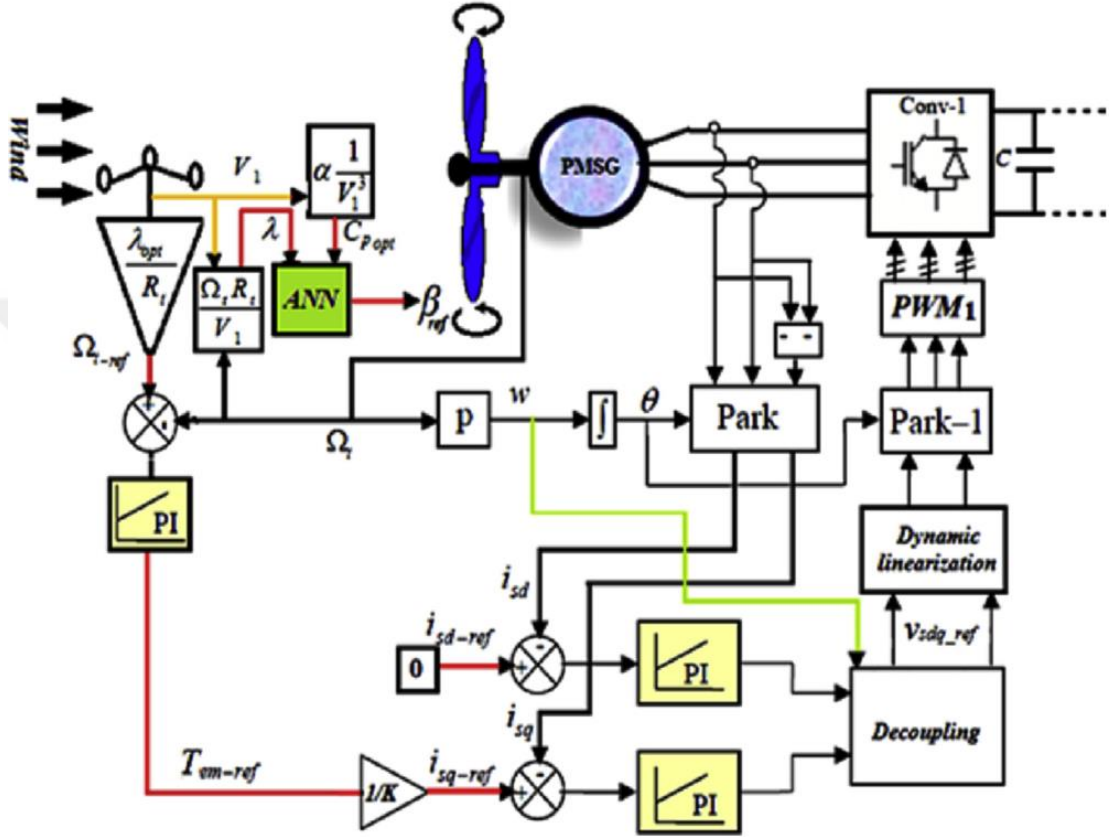
Prof. Dr. Ahmet Serdar YILMAZ ve Zafer ÖZER'in 2009 yılında yaptıkları çalışmada [27] RBF ve MLP kontrolörler tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolör modellemesi şekil 5.5 ile gösterildiği gibidir.

Rüzgâr Enerjisi dönüşüm sistemlerinde tork ve çıkış gücü rüzgâr hızındaki değişimlere bağlıdır. Rüzgâr hızı belli bir değerin üzerine çıktığında çıkış gücü türbinin çok yüklenmesini önlemek amacı ile limitlenmelidir. Uygun bir kanat açısı güç ve tork hatası ile sağlanabilir. Yapılan bu çalışmada kullanılan hata çıkış gücü ve istenilen çıkış gücü arasındaki hatadır.

Bu çalışmada RBF ve MLP ile kanat açısı kontrol edilmiştir. Sunulan bu kontrolörlerin avantajı çeşitli durumlara kolaylıkla uyum sağlaması ve hızlı cevap kapasitesidir.

Her iki ağ, MATLAB/Simulink kullanılarak oluşturulmuştur. Her iki ağın bir adet gizli katmanı ve bir adet çıkış katmanı bulunmaktadır. RBF ve MLP'nin gizli katmandaki nöron sayıları sırasıyla 5 ve 10'dur. Ayrıca öğrenme katsayısı sırasıyla 0.15 ve 0.1'dir.

RBF ile tasarlanan sistem çıkışı yüksek kaliteli ve herhangi bir bozulma olmadan elde edilmiştir. Aşımalar ve salınımlar daha iyi bir şekilde minimize edilmiştir. RBF geri beslemeli ağdan %2.021, bulanık mantıktan %4.623 ve PI kontrolörden %9.89 daha iyi bir güç çıkışı sağlanmıştır. RBF kontrolörün daha kısa bir yerleşme zamanı da vardır. Bundan dolayı RBF kontrolör kullanılması önerilmektedir.



Şekil 5.7 Rüzgâr türbini tasarımı ve kontrolörler [29]

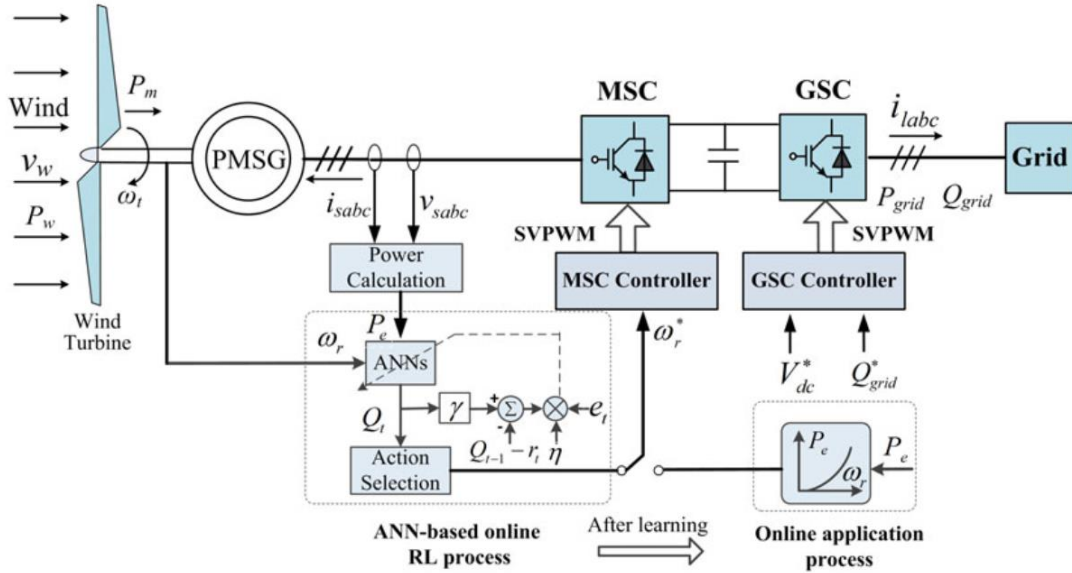
Dahbi ve arkadaşlarının 2016 yılında yayınladıkları makalede [29] değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin yapay sinir ağı ile kanat açısı kontrolü sağlanmıştır. Çalışmada şebekeye bağlı sabit mıknatıslı senkron jeneratör kullanılmıştır. Ayrıca rüzgârdan elde edilen gücün maksimum olması için bir takım yeni yaklaşımlara gidilmiştir. Tüm sistem MATLAB/Simulink kullanılarak tasarlanmıştır. Programda tasarlanan bu sistem şekil 5.7 ile gösterilmiştir.

Bu çalışmadan maksimum güç izleme ile kanat açısı başarılı bir şekilde kombine edilmiş olup optimizasyon, sağlamlık ve performans artışını sağlayacak düşük bütçeli olarak fayda görülmüştür.

Çalışmada iki şey amaçlanmıştır. Düşük rüzgâr hızlarında maksimum güç çıkışı ve enerji üretiminin devamlılığının garanti altına alınması.

Yapay sinir ağı olarak MLP kullanılmıştır. Bir giriş katmanında 2 nöron bulunmaktadır. Bunlardan biri güç katsayısı diğeri ise uç hız oranıdır. İki adet gizli katmanı vardır. Birinde 20 diğeri ise 10 adet nöron bulunmaktadır. Çıkış katmanında ise kanat açısı üretilir yani 1 adet nöron vardır. Gizli katmanlarda kullanılan aktivasyon fonksiyonu hiperbolik sigmoid olup çıkış katmanında kullanılan aktivasyon fonksiyonu lineerdir. Kullanılan eğitim fonksiyonu Levenberg-Marquardt algoritmasıdır.

Sonuçta rüzgâr hızı nominal değerin üzerine çıktığında (9.28 m/s) yapay sinir ağı tarafından üretilen kanat açısı da artmaktadır. Buda rüzgâr türbinini aşırı yüklenmeden koruyarak türbinin nominal değeri olan 6.6 kW sabit tutulmasını sağlamıştır. Ancak nominal değerin altındaki rüzgâr hızlarında en yararlı çıkış gücünün elde edilmesinde maksimum güç izleme (MPPT) yöntemi kullanılmıştır. Bu sistemin 3.3'üncü saniyeden sonraki rüzgâr düşümlerine verdiği cevap salınımları büyük olmuştur. Ancak rüzgâr hızının daha sabit seyrettiği durumlarda iyi bir performans yakalamıştır.



Şekil 5.8 Rüzgâr türbini ve yapay sinir ağı modellemesi [30]

Wei ve Liyan'ın yaptıkları çalışmalar [30] kanat açısı kontrolü yeni bir yöntemle sağlanmıştır. Bu çalışmada değişken hızlı rüzgâr enerji sisteminde sabit mıknatıslı senkron jeneratör yapay sinir ağlarında pekiştirmeli öğrenme ile maksimum güç izleme algoritması uygulanmıştır. Önerilen MPPT algoritması rotor hızı ve elektriksel güç arasındaki optimal ilişkiyi öğrenir. Bu çalışmada simülasyon ve deneysel çalışmalar birlikte yürütülmüştür. Tasarlanan sistem şekil 5.8 ile gösterilmiştir. 5 MW sabit mıknatıslı senkron jeneratör simülasyon da kullanılmıştır. Bu jeneratörlerin gerçek dünya uygulamalarında kullanımı daha yaygındır.

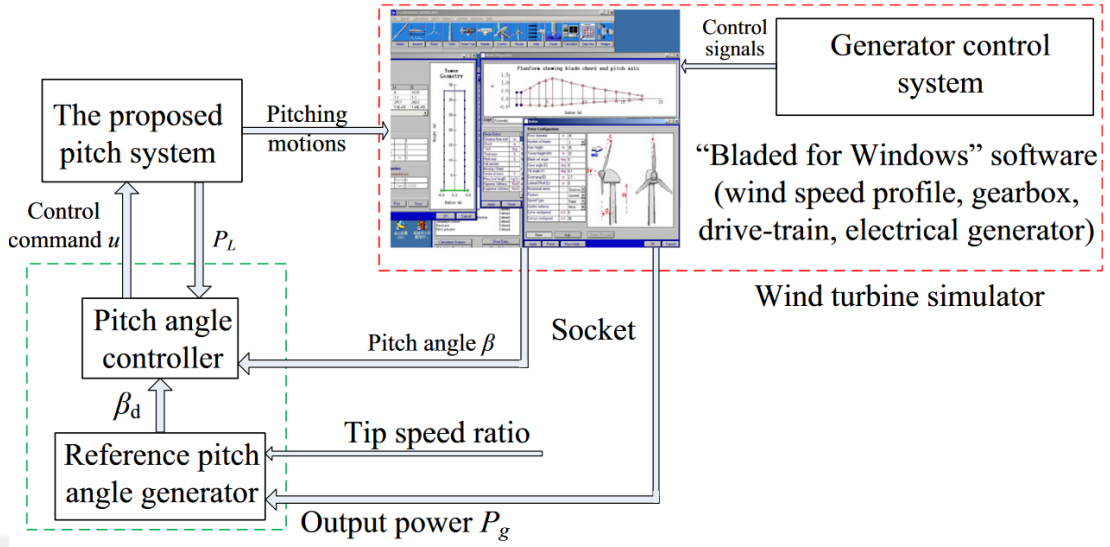
Rüzgârdan elde edilen enerjinin verimli olabilmesi için etkili bir algoritma şarttır. Etkili bir maksimum güç izleme algoritması güçtür. Büyük rüzgâr türbinlerinde kullanılan üç ana MPPT metodu olduğu söylenebilir. Bunlar türbin güç profili, optimal uç hız oranı ve optimal ilişki tabanlı kontrollerdir.

MPTT kontrol kaçınılmaz bir şekilde etkinliğine çeşitli çevresel sebeplerden dolayı yitirecektir. Bu sebepler rüzgâr türbininin eskimesi, kanatlardaki erozyon, mekanik problemler vs. olarak söylenebilir. Böyle durumlarda akıllı ve sürekli gelişen bir algoritmanın varlığı istenmektedir.

Pekiştirmeli öğrenmede ajan adı verilen gözlemci durum, aksiyon ve ödül parametreleri aracılığıyla çevresi ile etkileşime girerler. Ajanın ana amacı ödülün gelecekte maksimize olacağı aksiyonu seçmektir. Toplam ödül durum değişkeni fonksiyonu ile tanımlanır. Bu değer ajan için verilen durumun ne kadar iyi veya kötü olduğunu işaret eder.

Önerilen zeki MPPT algoritması iki işlemde meydana gelir. Biri sürekli öğrenme işlemi diğeri ise sürekli uygulama işlemidir. Yapay sinir ağı tabanlı pekiştirmeli öğrenme algoritması uygulama işlemindeki optimal ilişkileri bulur. Optimal güç eğrisi çevresel etkilerden dolayı değişince, sürekli öğrenme algoritması yeni optimal güç eğrisini çalıştırma yeteneğine sahiptir.

Simülasyonlar PSCAD/EMTDC ile yapılmıştır. İlk olarak geleneksel yöntem kullanılmıştır. Güç katsayısı sadece küçük farklarla rotor hızını takip etmiştir. Önerilen yapay sinir ağı yöntemi ile maksimum güç değerini daha az salınımla ve daha iyi takip etmiştir. Önerilen MPPT algoritması geleneksel yöntemle göre %6 daha fazla enerji üretmiştir. Bu oran 158 MJ olmuştur.

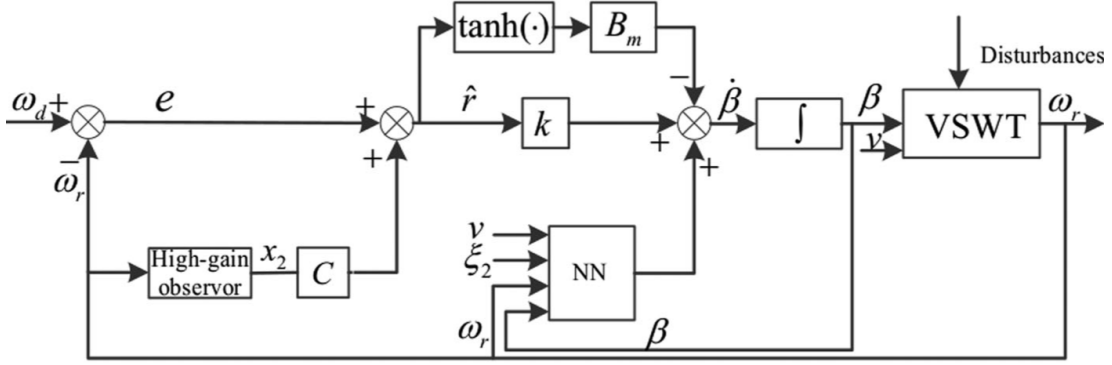


Şekil 5.9 Sistemin genel modellemesi [31]

Yin ve arkadaşlarının 2019 yılında yayınlanan çalışmalarında [31] yeni bir elektro-hidrolik servo kanat açısı sistemi önerilmiştir. Bu sistemin işleyişi şekil 5.9 ile gösterilmiştir. Önerilen bu yeni kanat açısı sisteminin performansı artırması ve rüzgâr türbini dalgalanmalarında iyi bir jeneratör güç çıkışı vermesi amaçlanmıştır. Sistemin ayarlanması ve dinamik modeli de çalışmada sunulmuştur. Uyarlanabilir sağlam bir integral modlu kanat açısı kontrolörü ve projeksiyon tipli uyarlamalı kanun istenilen kanat açısını doğru bir şekilde takip edebilmesi için sentezlenmiştir. Karşılaştırılabilir sonuçlar uyarlanabilir şemaya sahip olan bu yeni kanat açısı kontrolörünü doğrulamıştır.

Genele bakıldığında hali hazırda iki çeşit kanat açısı sistemi olduğu söylenebilir. Bunlar elektro-mekanikal ve hidrolik tipleridir. Bu iki tipin de birbirine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Sonuçta jeneratör güç çıkışı incelendiğinde güç değerleri 1.28 MW ve 1.8 MW ölçülmüştür. Genel olarak bakıldığında ise önerilen yeni kanat açısı sistemiyle güç çıkışı optimal 1.5 MW değerini koruyup iyi bir çıktı verdiği görülmüştür. Buna göre önerilen kanat açısı sisteminin güçlü rüzgâr esintilerinde daha doğru ve daha hızlı cevap verdiği görülmüştür.

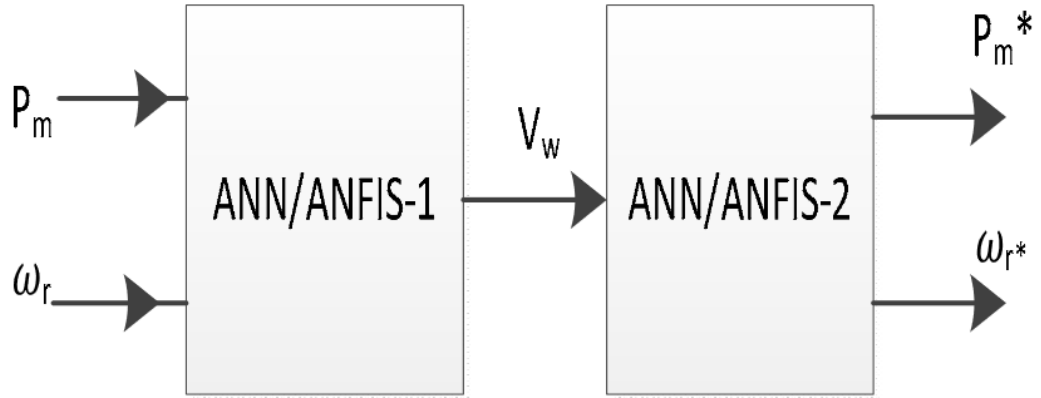


Şekil 5.10 Rüzgâr türbini tasarımı [32]

Jiao ve arkadaşları 2019 yılında yayınlanan çalışmalarında [32] MATLAB/Simulink ortamında kanat açısı kontrol sistemi tasarlamışlardır. Tasarlanan sistem Şekil 5.10 ile gösterilmiştir. Adaptif yapay sinir ağı ile değişken hızlı rüzgâr türbininin kanat açısı kontrol edilmiştir. Rüzgâr türbini jeneratör gücü 1.5 MW, kanat çapı uzunluğu 40 metre, devreye alma rüzgâr hızı 3 m/s, devreden çıkarma rüzgâr hızı 25 m/s'dir.

Bu çalışmadaki kontrolün ana amacı rotor hızı ve jeneratör güç değerini belirlenen referans değerinde tutmaktır. Öyle ki sistem parametreleri olmadan hatta dış bozucu girişlere rağmen referans değeri korumaktır. Kontrol sinyalinin sürekliliği, aktüatörlerin bant genişliği gereksinimini rahatlatmak için de garanti edilir ve kanat açısı sistemlerindeki mekanik yük azaltılır. Ardından, rüzgâr türbininin bilinmeyen doğrusal olmayan aerodinamiğini tahmin etmek ve önerilen uyarlanabilir parametresiz kontrolörün uygulanabilirliğini genişletmek için bir sürekli öğrenme tahmincisi (OLA) kullanılır. Ek olarak, rotor ivmesinin bir tahminini elde etmek için yüksek kazançlı bir gözlemci uygulanır, bu da ek sensörlere olan ihtiyacı azaltır.

Karşılaştırılan sonuçlara göre, önerilen çözümün geleneksel PI karşılığına göre daha iyi düzenleme performansı sağlayabildiğini ortaya koymaktadır. Sonuçlar 3 ayrı rüzgâr durumuna göre karşılaştırılmıştır. Türbülanslı rüzgârda, jeneratör şaft hızının standart sapması NN kontrolörü için 0.0206 rad/s ve PI karşılığı için 0.0351 rad/s'dir. NN kontrolör, daha küçük salınım üretmiştir ve sonuçta şebeke entegrasyonu için daha yüksek kalitede elektrik enerjisi sağlayabilir.



Şekil 5.11 iki adet ANFIS tasarımı [33]

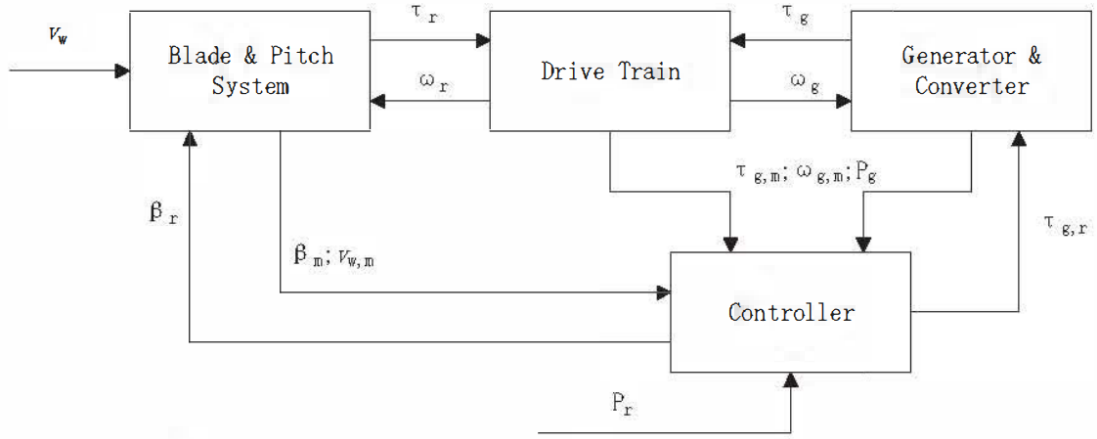
Rahman ve A.H.M.A. Rahim'in 2016 yılında yaptıkları çalışmada [33] rüzgâr türbini performansı sensör kullanılmadan MPPT ile kontrol edilmiştir. Yapılan çalışmada yapay sinir ağı ve adaptif nöro-fuzzy kontrolör kullanılmıştır. Rüzgâr enerjisi sisteminde maksimum güç çıkışı gözlemlenmiştir. Her iki kontrolörün de maksimum gücü yakalamada başarılı olduğu görülmüştür. Bu başarı çeşitli rüzgâr hızlarına karşı verdikleri çok küçük hatalarla anlaşılmıştır. Tasarlanan ANFIS sistemi şekil 5.11 ile gösterildiği gibidir.

Yapay sinir ağı olarak geri beslemeli algoritması eğitim işlemi boyunca ağı eğitmek için kullanılmıştır. Ağırlıkların değişimi için ise gradyan iniş tekniği kullanılmıştır.

ANFIS, yapay sinir ağları ile bulanık karar mekanizmasını birlikte daha etkili olabilmek için kullanır. Bu algoritmaların hiçbiri rüzgâr hızının ölçümüne gerek duymamaktadır.

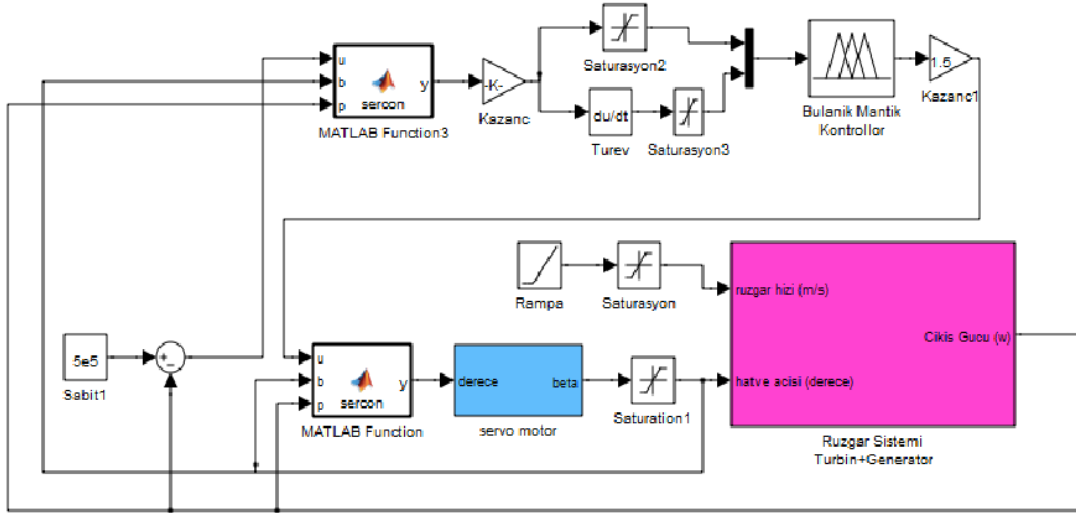
ANFIS sistem yapay sinir ağı tabanlı sisteme göre biraz daha iyi sonuçlar göstermiştir. Maksimum güç çıkışı ve rotor hızlarında benzer performanslar gözlemlenmiştir.

Yapay sinir ağının 2, ANFIS sistemin ise 1 çıkışı vardır. Yapılan çalışmalar MATLAB/Simulink ile tasarlanmıştır. Önerilen sistem Şekil 5.11 ile gösterilmiştir. Çalışmada iki seri ağ kullanılmıştır. Birinci ağda rüzgâr hızı tahmin edilmiş olup ikinci ağa giriş olarak verilmektedir ve çıkıştan rotor hızıyla güç gözlenmektedir. Her iki ağda yaklaşık 1000 veri seti kullanılmıştır.



Şekil 5.13 Rüzgâr türbini modellemesi ve kanat açısı [35]

Dapeng ve arkadaşlarının 2021 yılında yayınlanan makalesinde [35], rüzgâr türbinlerindeki bakım maliyetlerini düşürmek ve operasyon seviyesini yükseltmek için çalışmalar yayınlamıştır. Şekil 5.13'te görüldüğü gibi bir mekanizma simüle edilmiştir. Çalışmada iki ayrı yapay sinir ağı kullanılmıştır. Bunlardan biri evrişimli yapay sinir ağı diğeri ise çok katmanlı algılayıcıdır. Bu iki ağ gözlenen sistemdeki hataları belirlemek için kullanılmıştır. Her iki model de rüzgâr türbininden gelen verilere göre eğitilmiştir. Kıyaslama modeli ve tanıma doğruluğunda bir karşılaştırma yapılmıştır. Çalışma sonucunda evrişimli ağın eğitim süresi çok katmanlı algılayıcıya göre daha uzundur. Ancak evrişimli ağın sonucu çok katmanlı algılayıcı sonucuna göre yaklaşık %10 daha iyi bulunmuştur. Sonuçta iki model de kararlılığın sağlanması açısından önerilmiştir.



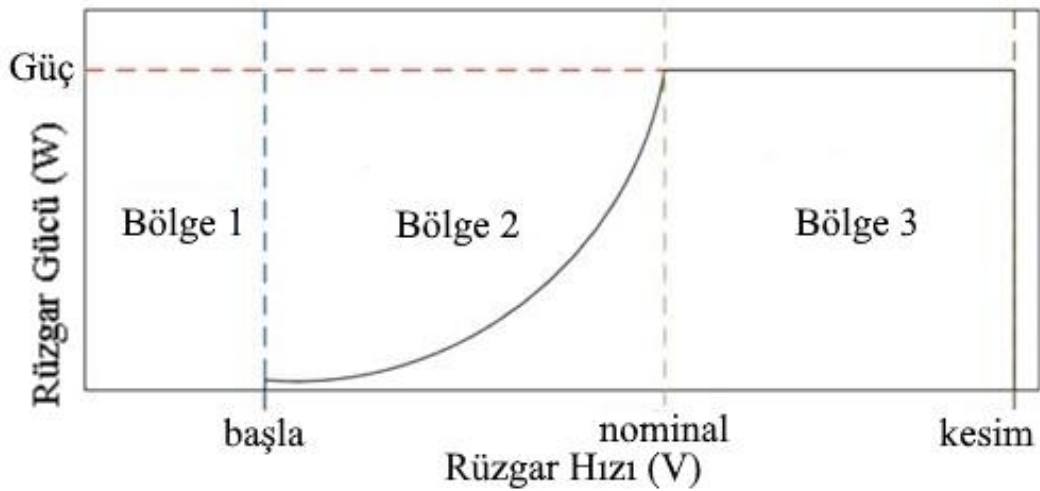
Şekil 5.14 Rüzgâr türbini sistemi modellenmesi ve bulanık kontrol [36]

Civelek 2013 yılında yayınlanan yüksek lisans tezinde [36] kanat açısı değiştirebilen jeneratör rotor hızı değişken olan rüzgâr türbinleri simüle edilmiştir. Kanat açısını değiştirebilen elektrikli sistemleri de içermektedir. Bu elektrikli sistemlerin incelenmeye ve geliştirilmeye ihtiyacı olduğu belirtilmiştir. Kontrol yöntemleri olarak PID, bulanık mantık kontrolör yöntemi ve bu iki kontrol yönteminin birleştirilmesinden oluşan bulanık-PID kontrolör tasarlanmıştır. Tasarlanan bulanık mantık kontrolörü ve rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi şekil 5.14’te görüldüğü gibidir.

Bu tezde rüzgâr hızı ve çıkış gücü arasındaki ilişki incelenerek çıkış gücü kalitesinin iyileştirilmesi için çeşitli kontrol mekanizmalarının takibi ve analizi yapılmıştır. Sistem yaklaşık 40. saniyede referans değeri 500 kW güce ulaşmıştır. Performans karşılaştırılması için sistemin kararlı hal hatası %1’in altına düşmesi başarılı bir sınır olarak ele alınmıştır. PID kontrolör %0.57’lik aşma değeri ile %1’lik sınırın altında kalarak başarılı olmuştur. Bulanık mantık kontrolörü %1.61’lik ama değeri ile sınırın üstünde olduğu için başarısız oldu denilebilir ancak çok kısa zamanda %1’in altına düşmeyi başarmıştır. Bulanık-PID kontrolör ise %0.02’lik aşma değeri ile en iyi performansı göstermiştir.

6. RÜZGÂR TÜRBİNİ GÜÇ KARAKTERİSTİĞİ

Rüzgâr türbinlerinde anlaşılması gereken en önemli yerin rüzgâr türbini güç karakteristiği olduğu düşünülebilir. Bir güç eğrisi, bir rüzgâr türbininin gücünün rüzgâr hızıyla nasıl değiştiğini gösterir [13]. Değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbinlerinde 3 farklı operasyon bölgesi bulunmaktadır. Bu da kontrol edilmesi gerekebilen 3 farklı durumu ortaya koyar. Bu 3 bölgeyi sıralayacak olursak. 1. bölgede rüzgâr hızı, rüzgâr türbini devreye girmesi için gerek olan rüzgâr hızından düşüktür ve rüzgâr türbini rüzgâr hızı belirli bir hıza ulaşınca kadar kapalı tutulur. Yani bu bölgede rüzgâr türbini çalışmamakta ve durur vaziyettedir. 2. Bölgede rüzgâr hızı, türbin çalışması rüzgâr hızı ile nominal güç rüzgâr hızı arasındadır. Bu bölgede rüzgâr türbini çalışır vaziyettedir ve kanat açısı kontrol edilmemektedir. 3. bölgede artık nominal çıkış için kontrol edilen rüzgâr hızı bulunmaktadır. Bu bölge ise rüzgâr türbinin kullanabileceği maksimum rüzgâr hızına kadar olan kısımdır. Şekil 6.1’de görüldüğü üzere bu bölgedeki rüzgâr hızı ne kadar artarsa artsın çıkışta her zaman sabit güç görülmektedir. Ancak bu bölgede aşırı rüzgâr hızı yüklemesini önlemek için belirli bir değerin üzerinde iken sistem kapatılmaktadır. 3. bölgede artık kanat açısı kontrolü sabit bir güç çıkışı elde edebilmek için zorunlu hale gelmektedir. 2. Bölgede 0 olan kanat açısı 3. bölgede nominal değerde olmalıdır. Kanatlar üzerinde bulunan servo motorlar sayesinde kanatlar döndürülerek kanat açısı değiştirilir. Döndürme işleminin nasıl ve ne zaman olacağına kontrolör karar verir. Bu bölgeler şekil 6.1’de bölge 1, bölge 2 ve bölge 3 olarak gösterilmiştir [37], [38], [39].



Şekil 6.1 Rüzgâr türbini çıkış gücü karakteristiği

7. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ KONTROLÜ

Rüzgâr türbini aerodinamik davranışları bir uçak kanadıyla çok benzerdir. İkisi de yüzeylerine gelen havayla beraber rüzgârın kaldırma kuvvetinden faydalanırlar. Kanatın atak açıları türbinde oluşan kuvvet ve tork üzerinde çok kritik bir etkiye sahiptir. Yani bu da rüzgârdan elde edilen gücün oranını belirlemede önemli bir etkendir. Büyük rüzgâr türbinlerinde elde edilen gücün kontrolünde üç önemli kontrol yöntemi vardır. Bunlar pasif stall kontrol, aktif stall kontrol ve kanat açısı kontrolüdür.

Pasif stall kontrol diğer kontrolör yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha erken dönemlerde ve sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılmıştır. İlerleyen zamanlar bu teknoloji aktif stall kontrol yöntemine dönüşmüştür. Kanat açısı kontrolü ise aktif stall kontrole göre daha hızlı sonuç vermekle beraber kontrol edilebilirliği daha fazla olmaktadır [14].

7.1. Pasif Stall Kontrol

Pasif stall kontrolde kanatlar rotor göbeğine sabitlenmişlerdir. Bu sabitlemedeki en önemli ayrıntı rüzgârın geliş yönüne göre optimum bir açıda olmasıdır. Belirli bir rüzgâr hızının üzerinde optimize bir şekilde sabitlenen kanatlar yardımıyla maksimum çıkış gücünün alınması beklenir. Eğer rüzgâr hızı çok kuvvetli gelirse kanat yüzeylerinde bir türbülans etkisi oluşturacaktır. Sonuçta bu etkiyle beraber rüzgârın kuvveti de azalacak ve kanatlarda daha az bir kaldırma vuku bulacaktır. Türbülans olayı her ne kadar uçaklarda istenmeyen bir durum olsa da rüzgâr türbini kontrolünde lehimize kullanılabilir bir durumdur. Azalan kaldırma kuvvetiyle beraber rüzgâr türbinin alabileceği hasarlar ortadan kalkmış olur.

7.2. Aktif Stall Kontrol

Aktif stall kontrolde kanat açıları kontrol edilerek daha düşük hızlarda da güç kontrolü yapılmış olur. Bu da bize kontrol edilen rüzgâr türbini için daha fazla esneklik sağlar. Rüzgâr hızının aşırı arttığı durumlarda, kanatlar daha fazla rüzgârın geliş yönüne çevrilir. Bu nedenle elde edilen güç de düşürülmüş olacaktır. Kanat açıları ayarlanarak bölüm 5'te anlatılan güç karakteristiğine de ulaşılmış olur. Bu kontrol yönteminde aşırı rüzgâr hızı durumlarında rüzgâr türbini durdurularak rüzgârın türbine verebileceği zarar önlenmiş olacaktır.

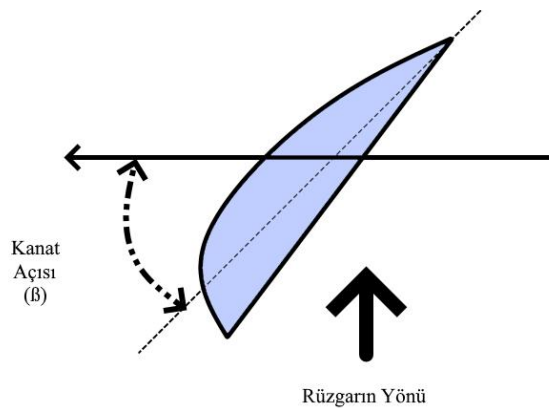
Aktif stall kontrolde nominal rüzgâr hızının üzerinde iken çıkış gücü karakteristiği istenilen değerde durabilir. Aktif stall kontrol yüksek çıkış gücü olan rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

7.3. Kanat Açısı Kontrolü

Aktif stall kontrole benzer olarak, kanat açısı kontrolünde rüzgâr türbini kanatlarının açısı belirli bir rüzgâr hızının üzerindeyken kontrol edilmesi istenebilir. Rüzgâr hızı belirli bir değer üzerindeyken kanat açısı kontrolörü kanatların rüzgâr atak açısını düşürmek için kanatları hareket ettirirler. Böylelikle kanatın önünde ve arkasında oluşan baskılar nedeniyle kanata bir kaldırma kuvveti etki etmiş olur. Bu model şekil 7.1 ile gösterilmiştir.

Eğer türbine gelen rüzgâr hızı belirli bir değer altındaysa kanat açısı sabit ve 0 değerinde tutulur. Belirli değer üzerindeki rüzgâr hızlarında kanat açısı artırılır ama atak açısı azaltılmış olur. Böylece kanata uygulanan kaldırma kuvveti de azalmış olur. Eğer kanat açısı maksimum değerine ulaşırsa üzerine gelen rüzgârla aynı hizaya gelmiş olur. Böylelikle türbin de dönemeyecek ve mekanik frenler kullanılarak durdurulacaktır. Frenlenmesinin sebebi ise rüzgâr türbinin alabileceği hasarı önlemektir.

Aktif stall ve kanat açısı kontrolünün ikisi de kanatları döndürerek çalışmaktadır. Kanat açısı kontrolünde kanat rüzgâra yönüne doğru döndürülür ve kanattaki kaldırma kuvveti azaltılır. Aktif stall kontrolde ise rüzgâra doğru döndürülür ve oluşan türbülans kontrol için kullanılır.



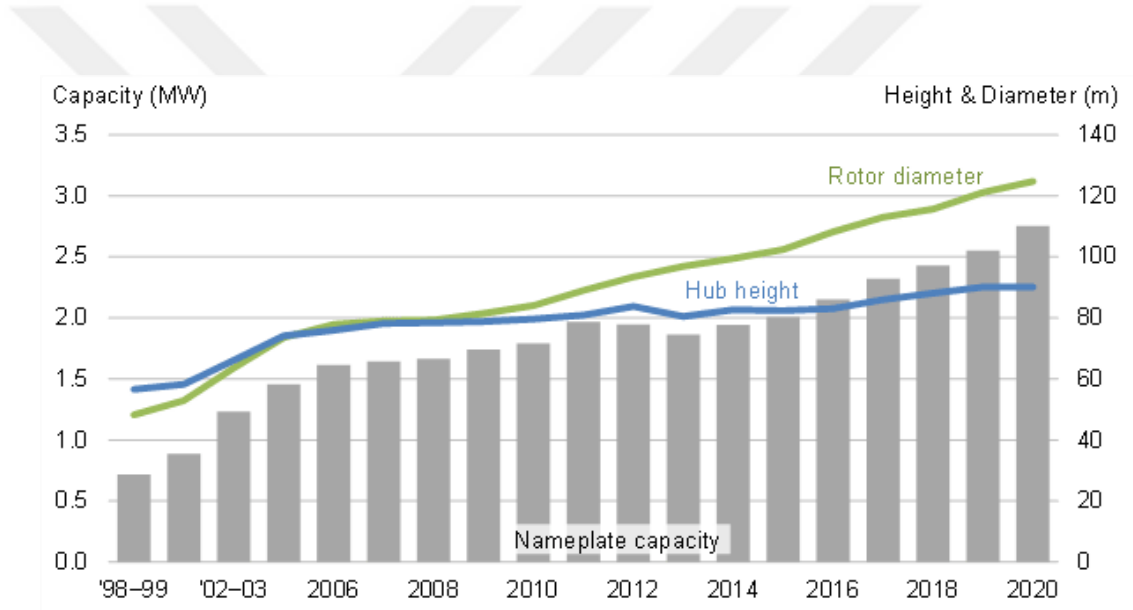
Şekil 7.1 Kanat Açısının Ayarlanması

8. RÜZGÂR GÜCÜ

Rüzgarla gelen gücü jeneratörde elektrik enerjisine çevirmek bir takım matematiksel modellerle gösterilebilir. Bu matematiksel modelin oluşturulmasında kullanılan yardımcı ögeler bu başlık altında incelenmiştir.

8.1. Rotor Alanı

Kanat süpürme alanı olarak da söylenebilir. Türbin kanatlarının ne kadar büyük bir alanı taradığını belirtmek için kullanılan bir terimdir. Rotor çapı büyüdükçe rotor alanı da artacaktır ve Eş. 8.4'te gösterildiği üzere türbin çıkış gücü de artacaktır.



Şekil 8.1 Rotor alanı, Kule yüksekliği ve güç çıkışı karşılaştırmaları [40]

Şekil 8.1'de görüldüğü gibi 2000 yılından 2020 yılına kadar olan süreçte artan çıkış güçlerine doğru orantılı olarak eşlik eden bir rotor çapı söz konusudur. Öyle ki 2004 yılından sonra türbin yükseklikleri bir azalış trendine girse dahi rotor çapıyla birlikte çıkış güçleri artmıştır. Bu oranlar şekil 8.1 ile gösterilmiştir [40].

8.2. Uç-Hız Oranı

Uç hız oranı rüzgâr türbinlerinin önemli bir parametresidir. Kanat hızının rüzgâr türbinine gelen rüzgâr hızına oranını ifade eder [14].

$$\lambda_T = \frac{\omega_M r_T}{v_w} \quad (8.1)$$

Kanat dönüş hızı (w_m) rotor çapı (r_T) ile çarpılır bu çarpım rüzgâr hızına (v_w) bölünür.

8.3. Hava Yoğunluğu

Rüzgar gücü yoğunluğu havanın yoğunluğu ile orantılıdır [41]. Standart şartlarda hava yoğunluğu 15 °C ve deniz seviyesinde 1.225 kg/m³ olarak belirlenmiştir.

8.4. Güç Katsayısı

Güç katsayısı C_p , güç düzenlenmesi için en önemli parametrelerden birisidir [42]. Doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Her türbin tipine özgüdür ve türbinin sağladığı rüzgâr hızının bir fonksiyonudur.

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{B} - C_3 B \beta - C_4 \beta^X - C_5 \right) e^{-\frac{C_6}{B}} \quad (8.2)$$

Eş. 8.2’de gösterilen C_1 - C_6 katsayılarıdır. Türbin tipine bağlı değişken x ile gösterilmiştir. β kanat açısı olarak seçilmiş. B ise Eş. 8.3’te gösterildiği gibidir.

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (8.3)$$

Daha sonra Eş. 8.2’de B yerine Eş. 8.3 ters çevrilerek yazılır. Sonuçta rüzgâr türbini güç katsayısı belirlenmiş olur.

8.5. Rüzgâr Gücünün Matematiksel Modeli

Rüzgâr türbini tarafından rüzgâr enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülürken simülasyonlarda kullanılan güç formülü Eş. 8.4 ile gösterilen matematiksel modeldir.

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin güç çıkışını hesaplama formülü Eş. 4'teki gibidir. Türbin rotoruna gelen rüzgâr enerjisinin, türbin süpürme alanının ve hava yoğunluğu gibi etmenlerin etkisi olduğu rüzgâr türbini çıkış gücü fonksiyonudur. Milet aktarılan moment ise Eş. 8.5'te ifade edilmiştir.

$$P_t = 0.5 A p C_p(\beta, \lambda) v^3 \text{ Watt} \quad (8.4)$$

$$T_t = 0.5 A p \left(\frac{C_p(\beta, \lambda)}{\lambda} \right) v^2 \text{ Nm.} \quad (8.5)$$

P_t türbinden elde edilen çıkış gücünü ifade etmektedir. p hava yoğunluğu, C_p güç katsayısını, A rotor süpürme alanını ifade etmektedir. β kanat açısı ve λ ise uç hız oranı olarak ifade edilmektedir. Uç hız oranı Eş. 8.1'de gösterilmiştir [43].

Matematiksel modelde, rotorun torku ve jeneratörün elektromekanik torku zıt hareket eder ve modelin girdileridir, dönüş hızları ise çıktıdır. Matematiksel model Eş. 8.6, Eş. 8.7 ve Eş. 8.8 ile temsil edilir [44].

$$\frac{dw_g}{dt} = \frac{1}{2H_g} \left[-\frac{P_e}{w_g + w_0} - D_{tg}(w_g - w_t) - k_{tg}\Delta \right] \quad (8.6)$$

$$\frac{dw_t}{dt} = \frac{1}{2H_t} \left[-\frac{P_m}{w_t + w_0} + D_{tg}(w_g - w_t) - k_{tg}\Delta\theta_m \right] \quad (8.7)$$

$$\frac{d(\Delta\theta_m)}{dt} = w_{base}(w_g - w_t) \quad (8.8)$$

Burada atalet sabiti kütleinin geometrik dağılımına bağlıdır. Atalet, jeneratörün dönüş halindeki kütleinin kinetik enerjisi ile nominal gücüne ulaştığı süreyi temsil eder. Atalet momenti Eş. 8.9 ve Eş. 8.10'a göre hesaplanır:

$$H_{rotor} = \frac{J_{rotor} w_{rotor}^2}{2P_n} \quad (8.9)$$

$$H_{gen} = \frac{J_{gen} w_{gen}^2}{2P_n} \quad (8.10)$$

Rüzgâr rotoru durumunda, atalet, Eş. 8.11 ile yaklaşık olarak hesaplanabilir:

$$J_{rotor} = \frac{1}{8} m_r R^2 \quad (8.11)$$

Burada m_r , rotorun kütleini (kanatları içerir) temsil eder ve R , rotorun yarıçapıdır.

$$\frac{dP_{inp}}{dt} = \frac{1}{T_{pc}} [(w_g + w_0)(K_{ptrg}(w_g + w_0 - w_{ref}) + K_{itrq}f_1) - P_{inp}] \quad (8.12)$$

$$\frac{dP_{1elec}}{dt} = \frac{1}{T_{pwr}} [P_{elec} - P_{1elec}] \quad (8.12)$$

$$\frac{dV_{ref}}{dt} = K_{Qi} [Q_{cmd} - Q_{gen}] \quad (8.12)$$

$$\frac{dE_{qcmd}}{dt} = K_{vi} [V_{ref} - V] \quad (8.12)$$

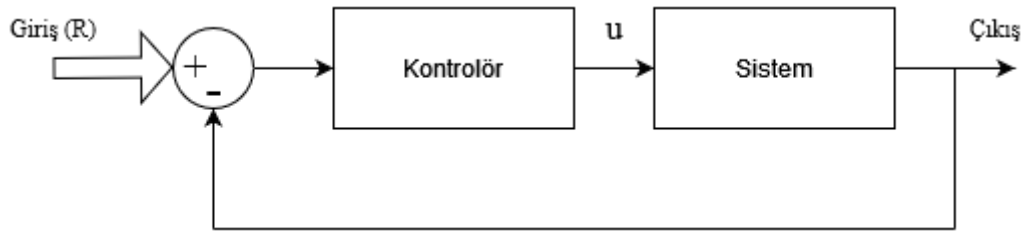
$$\frac{df_2}{dt} = P_{inp} - P_{stl} \quad (8.12)$$

Diferansiyel denklem gösterimindeki model yukarıdaki gibidir [45]. P_{1elec} , P_{elec} 'in filtrelenmiş bir versiyonudur ve kararlı durumda eşdeğerdirler. Şebekeye verilen elektrik gücü P_{elec} ve Q_{gen} ile verilir. E_q reaktif voltajdır.

9. PID KONTROL

Sistemlerin kontrol edilmesi 1769 yılında James Watt'ın buhar makinesini kontrolü ile sanayi devrimini başlatan olay diyebiliriz. PID sistemlerin kontrol edilmesi için oluşturulan kullanışlı bir sistemdir [46].

Bu bölümde oransal (P), integral (I) ve türev (D) kontrolörlerinin her birinin yapısı ve istenilen çıkış cevabı için nasıl kullanıldığı anlatılacaktır. PID denetim sürekli denetleyen bir sistemdir. Denetlenen ise bir sistem veya tesisattır. Denetim sisteminden belli bir cevap almak için bir dış enerji kaynağından sisteme giriş sinyali yollar. Çıkış ise denetim sisteminden çıkan gerçek yanıttır. Bu sırada çıkış cevabını etkileyen bozucu girişler de meydana gelebilir. Sisteme çevresinden veya içinden etki eden bu sinyaller arzu edilmezler. Bozucu girişler sistemin dışından geliyorsa dış bozucu girişler. Sistemin içinden geliyorsa iç bozucu girişler adını alır. Bozucu girişler tahmin edilemez özellikte olabilir. Şiddetleri çok fazla olabileceği gibi az da olabilir. Denetlenen sistemin cevabı arzu edilen değerden sapar. Denetleyici sistem bu hatayı da azaltmaya çalışır. Hata sinyali geribesleme elemanı ile sensörler yardımıyla ölçülebilir. Geribesleme sinyali denetleyicinin anlayabileceği bir sinyale dönüştürülür. Geribesleme sinyali referans değerle karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucu PID denetleyici uygun kontrol sinyali üreterek sisteme yollar. Bu sistemler hata sinyali olduğu müddetçe denetimin de sürekli olacağı bir sistemlerdir. Kontrolörlerin sistem üzerindeki etkileri şekil 9.1'de birim geri besleme sinyali ve cevap sinyali üzerinden anlaşılabilir [47].



Şekil 9.1 PID Kontrolör Genel Yapısı

Şekil 9.1'de gösterilen sistemden kasıt aslında kontrol edilmesi istenen yapı, alet, makine, tesisat veya herhangi bir elektrikli alet olabilir. Kontrolör bloğu sistem için

uygun kontrol sinyalini üretecek olan kontrolörü temsil eder ve tüm sistemin davranışını etkiler. Bu bölümde kontrolör olarak P, PI veya PID olabileceği üzerinde durulacak [48].

9.1. Tasarım İlkeleri

İyi tasarlanmış bir denetim sisteminin asgari bazı koşulları sağlıyor olması gerekir [48].

Sistemler sıfır veya olabilecek minimum kalıcı durum hatasına sahip olmalıdır. Hata değerini sıfırda tutmak her zaman olanaklı olamayacağı için hat değerleri belirli bir tolerans değerinin içinde tutulmalıdır. Örneğin hata değerinin %5'in altında olması gibi.

Sistemlerin cevabının hızlı olması beklenir. Kontrol edilen sistemin kalıcı durum cevabına daha hızlı ulaşması beklenir. Böylelikle geçici durum cevabını da hızlıca geçmiş olur.

Denetim sistemi kararlı çalışmalıdır. Yani sınırlı bir girişe karşılık sınırlı çıkış vermektir [49].

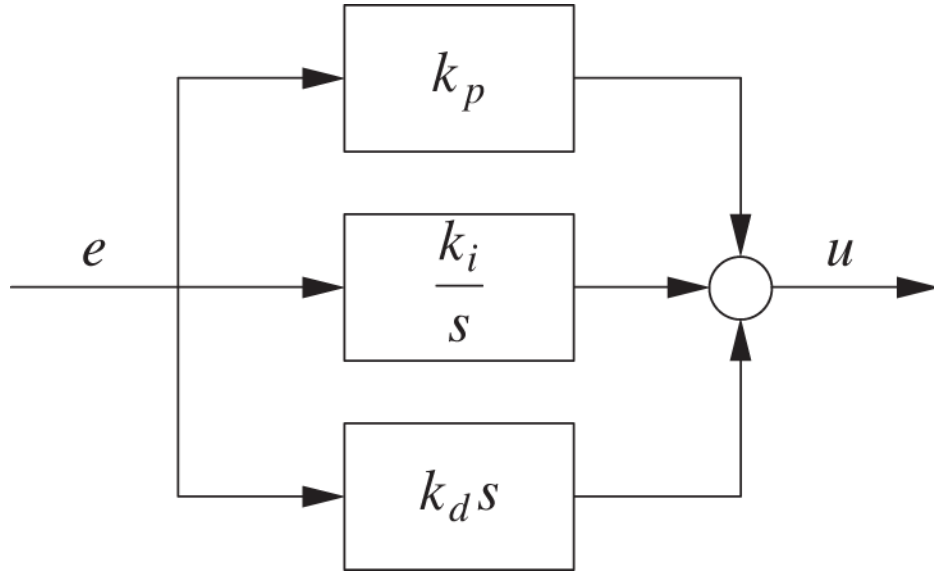
İyi tasarlanmış bir denetim sisteminden ürün kalitesini arttırırken maliyeti düşürmesi beklenir.

9.2. PID Denetimin Avantaj ve Dezavantajları

PID denetim günümüz endüstriyel dünyasında değer görmektedir ve bunu da basit ve kullanışlı yapısına borçludur. Endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [50]. Ancak her sistemin olduğu gibi PID sistemin de negatif yanlarını göz önüne alırsak doğrusal olmayan sistemlerde çok kullanışlı değildir.

9.3. PID Denetimin Kontrolör Modeli

PID kontrolörün üç terimli yapısı bulunmaktadır. Bu yapı Şekil 9.2'de gösterilmiştir.



Şekil 9.2 PID Kontrolör Matematiksel Gösterimi

K_P oransal kazandı, K_D türevsel kazancı ve K_I integral kazancı ifade etmektedir. Kontrolörden geçen u sinyali Eş. 9.1’de gösterildiği gibidir. Ayrıca PID kontrolörünün transfer fonksiyonu Eş. 9.2’deki gibidir.

$$u = K_p e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (9.1)$$

$$K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \quad (9.2)$$

Kontrolörden geçen u sinyali tekrar tekrar sisteme yollanacak ve hata sinyali (e) düşürülmeye çalışılacaktır. Hata sinyaline ve çıkışa bakarak sistemin ne kadar iyi çalıştığı gözlenebilir.

9.4.PID Kontrolörlerin Özellikleri

Oransal kontrolör yükseliş zamanının azalmasına etki eder ancak sürekli rejim hatasını ortadan kaldırmada asla etkili değildir. İntegral kontrolör, sistemin sürekli rejim hatasını ortadan kaldırır fakat geçici rejim cevabını kötüleştirir. Türev kontrolörü sistemin kararlılığının artmasını etkiler, aşımı azaltır ve geçici rejim cevabını iyileştirir.

Kapalı çevrim sisteminde kontrolörlerin her birinin etkisi Çizelge 9.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 9.1 PID kontrolör katsayı değişimi sonuçları

	Yükseliş Zamanı	Aşım	Yerleşim Zamanı	Sürekli Rejim Hatası
KP	Azalır	Artar	Küçük Değişir	Azalır
KI	Azalır	Artar	Artar	Elenir
KD	Küçük Değişim	Azalır	Azalır	Küçük Değişim

Unutulmamalı ki birinin değişmesi diğer ikisine de etki edeceğinden Çizelge 9.1’de verilen bilgiler her zaman aynı oranda çalışmayabilir.

PID denetim sistemlerinde amaç kararlı bir kapalı döngü sinyal sistemi oluşturmak. Referans değeri doğru takip eden bir kontrolör tasarlamak. Bozucu sinyallerin etkisini azaltmak. Bazı filtreler kullanarak bozucu sinyalleri engellemek. Belirli asgari kriterleri sağlamaktır [51].

10. YAPAY SİNİR AĞLARI

Yapay zekâ araştırmaları insan beyninin incelenmesi ile edinilen bilgilerin açığa çıkarılması ile aynı işlevi görebilecek bir matematiksel üzerinde durur. Aslında beynin tam olarak çözümlenip çözülemeyeceği özyinelemeli oluşundan dolayı tartışmalıdır. Ancak yapay sinir ağlarının işlevi de büyüktür [52].

Beynimizle ilgili bugünkü bilgiler daha çok giriş ve çıkışıyla alakalıdır. Beynin merkezi değerlendirme aşaması hala anlaşılammıştır. Beynin çalışması üç bölüme ayrılabilir:

- Bilginin giriři
- Sentezleme ve kıyaslama
- Çıkış ve eylem

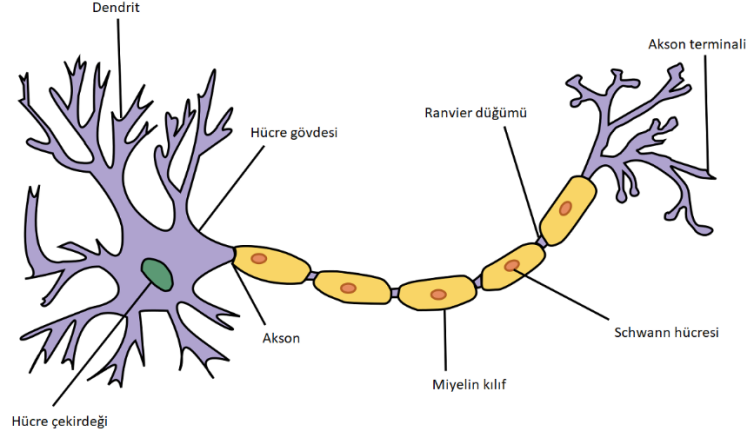
Yapay zekanın çözmesi için sunulan problemler beyin için kolay ancak normal bir bilgisayarın çözmesi zor olan problemlerdir. Makineler doğal dili anlayıp bir sonuç üretiyorsa veya satranç oynuyorsa, bu insan davranışlarının bilgisayara aktarılmasına değil bilgisayarın güçlü hesaplama yeteneğine dayanmaktadır.

Yapay sinir ağları ile gerçek sinir ağları arasındaki benzerlik oldukça zayıftır. Ancak esinlenme vardır. Doğal sinir ağları ve yapay sinir ağları arasında yapı ve kapasite bakımında büyük tezatlar vardır. Ancak gerçek beyin fonksiyonlarını örnek almak için insanlığın elinde yeterli bilgi de vardır. İlişkisi zayıf olsa bile YSA biyolojik öğrenmeyi temel alan bir durumdadır.

10.1. Biyolojik Nöronlar

İnsan beyni 4.7 milyar kitaplığa sahip bir kütüphaneye benzetilebilir. Bu kütüphaneyi oluşturan hücreleri denir. Nöronlar büyüklük ve görünüş olarak farklı olsalar da ortak özellik olarak üç bölgeye ayrılır. Bunlar:

- Soma
- Akson
- Dentritlerdir.



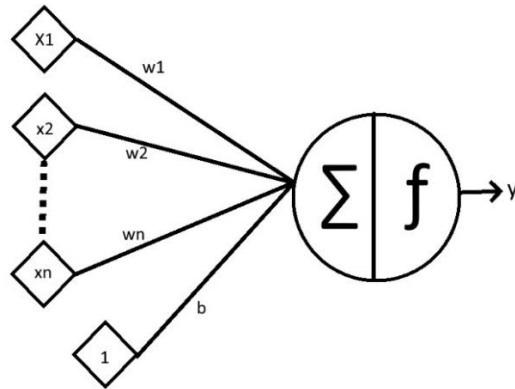
Şekil 10.1 Biyolojik Sinir Hücresi [53]

Soma olarak adlandırılan bölge hücreyi denetler ve hücre etkinliklerinin tümünü yönetmekle sorumludur. Hücre gövdesinden iki çeşit uzantı çıkmaktadır bunlar da dentritler ve aksondur.

Dentritlerde yoğun bir metabolizma etkinliği ve protein sentezi vardır. Diğer hücrelerden aldıkları bilgiyi hücre gövdesine taşır. Akson ise gövdedeki bilgiyi diğer nöronların dentritlerine taşımakla sorumludur. Akson sonları ile dentritler arasında sinaps adı verilen küçük boşluklar vardır. Sinyal aksonun ucuna ulaştığında özel kimyasal maddeler salgılanır. Bu yapı şekil 10.1 ile gösterilmiştir.

10.2. Yapay Sinir Ağlarının Modellemesi

Yapay sinir ağlarının modellenmesi için öncelikle nöronların modellenmesi gerekir.



Şekil 10.2 Matematiksel Sinir Hücresinin Modellemesi

Basit hale getirilmiş bir nöronun biçimsel tanımı ilk kez Mc Culloch ve Pits tarafından geliştirilmiştir. Bu model şekil 10.2’de gösterildiği gibidir.

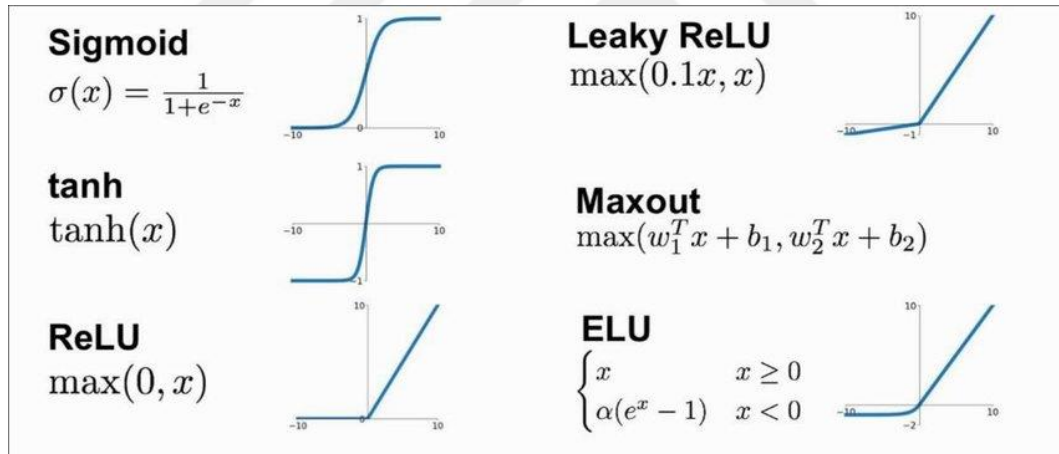
Nöron modellerinde x_i giriş değerleri w_i ağırlıkları ile çarpılarak tüm bu girişler toplanır. Bu toplama y dersek, Eş. 10.1’de gösterilen formüldeki gibi gösterilir.

$$Y = \text{toplama}(x * w) \quad (10.1)$$

Yapay sinir ağı çıkışı ikili biçimde ifade edileceği zaman y değeri belirli bir eşik değerinden geçirilerek eşiğin üstünde ise 1 altında ise 0 değeri üretilir. Bu Eş. 10.2 ile gösterilmiştir.

$$Y = \{ 1, 0 \} \quad (10.2)$$

Bu eşik değeri modeli aktivasyon fonksiyonu olarak da gösterilebilir. Yapay sinir ağlarında kullanılan çeşitli aktivasyon fonksiyonları mevcuttur. Bu aktivasyon fonksiyonlarından bazıları şekil 10.3’te gösterilmiştir. Bu fonksiyonlar doğrusal veya doğrusal olmayan biçimlerde dir.



Şekil 10.3 Yapay Sinir Ağları Aktivasyon Fonksiyonları [54]

Yapay sinir ağı modelleri bir ağın öğrenmesi gereken giriş-çıkış bilgilerine ve sentetik sinirler arası ilişkilerle ifade edilen mimarilere göre farklılıklar göstermektedir. Farklı öğrenme türleri yapay sinir ağları modelini belirlemektedir.

Tek katmanlı bir yapay sinir ağı düşünüldüğünde, Ağın çıktısı Eş. 10.3’teki gibi olacaktır. Q değeri eşik değeri olarak ifade edilir.

$$Y = f(\sum_1^n w_i x_i + Q) \quad (10.3)$$

Çıktımızın değerinin +1 ya da -1 olması sınıfları ifade eder. Eş. 10.4 ile gösterilebilir.

$$\sum_1^n w_i x_i + Q = 0$$

$$w_1 x_1 + w_2 x_2 + Q = 0$$

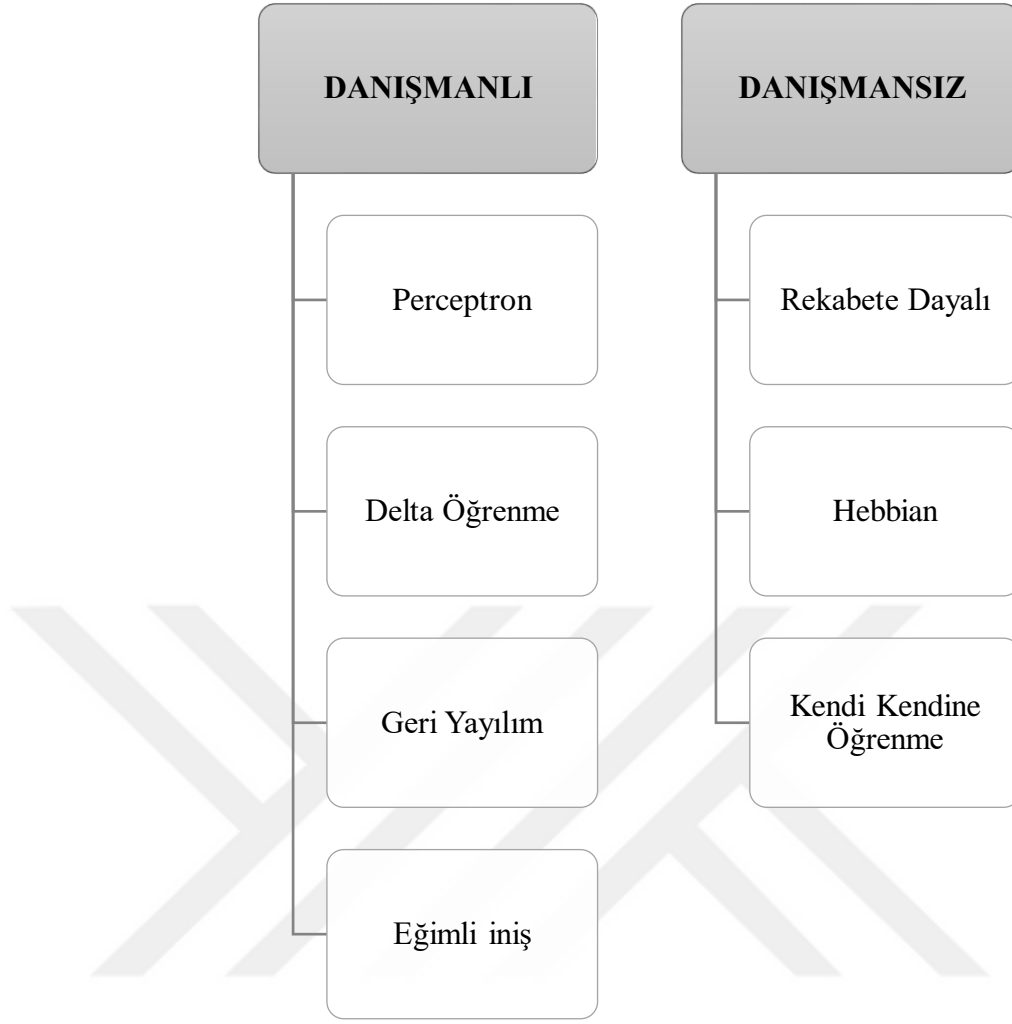
$$x_2 = -\left(\frac{w_1}{w_2}\right) x_1 - \frac{Q}{w_2} \quad (10.4)$$

Ağırlık ve eşik değerlerini değiştirerek doğrunun konumunun değiştirilmesi mümkündür. Sınıfları ayıran bu doğrunun tekrarlanarak bulunması yapay sinir ağlarında öğrenmenin temelini oluşturmaktadır.

10.3. Yapay Sinir Ağları Çeşitleri

Öğrenme biçimine göre yapay sinir ağlarını çeşitlerine ayıracak olursak. Danışmalı (Supervised) öğrenmede ağa giriş çıkış şeklinde ayrıntılı şekilde eğitim örnekleri verilmektedir. Danışmansız (Unsupervised) öğrenmede ise ağın giriş bilgileri verilerek problem çözümü ağdan istenmektedir.

Mimarisine göre ise determinist (belirli) ve skotastik (belirlik) olarak iki gruba ayrılır. Ayrıca sinir ağlarını, sinyalin akış yönüne göre ileri beslemeli (feed forward) ve geri beslemeli (feedback) türleri de bulunmaktadır [55]. Bu türler şekil 10.4 ile gösterilmiştir.

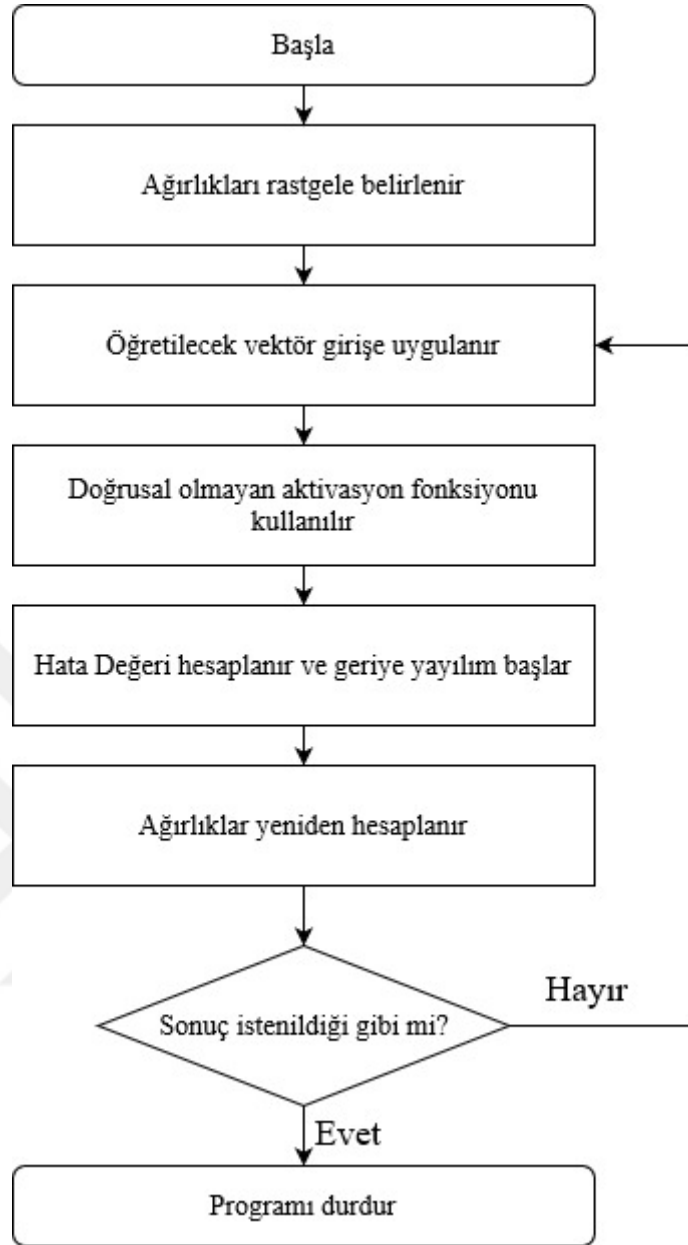


Şekil 10.4 Yapay Sinir Ağları Çeşitleri

10.4. Geri Yayılımlı Öğrenme

Geri yayılımlı öğrenme çok katmanlı ağlarda kullanılan bir öğrenme yöntemidir. Backpropagation olarak da bilinir. 0-1 arasında bir değer üreten sigmoid fonksiyonunu aktivasyon fonksiyonu olarak kullanır. Rastgele ağırlıklar kümesiyle başlanır. Ancak bazı çalışmalarda başlangıç değerlerinin de uygun seçilmesi göz önüne alındığında daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Ayrıca başlangıç ağırlıklarının durumu ağırlık öğrenme hızına da etki edecektir.

Çok katmanlı YSA temelde 3 katmandan oluşur. Bunlar Giriş katmanı (input layer), gizli katman (hidden layer) ve çıkış katmanı (output layer) olarak isimlendirilir. Gizli katman bir veya daha fazla olabilir. Her katman kendi içinde farklı değerlerde hücre sayısına sahip olabilir. Nöron sayısı fazla olursa ağ ezberlemeye yönelir.



Şekil 10.5 Geri yayımlı öğrenme akış şeması

Geril yayımlı öğrenmenin işlemsel şeması Şekil 10.5'te gösterilmiştir. Doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonu sigmoid seçilirse çıkış Eş. 10.5'te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$X_j = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad (10.5)$$

Belirlenen hata değerlerine göre ağırlık güncellemeleri Eş. 10.6'da gösterildiği gibi yapılır.

$$w_{jm}(k) = w_{jm}(k - 1) + \Delta w_{jm}(k) \quad (10.6)$$

Buradaki w_{jm} değeri ara katmandaki j. elemanın çıktı katmanındaki m. elemanla olan bağıntısının ağırlığını ifade etmektedir.



11. BULANIK MANTIK

Konuştığımız (doğal) dil insanlar arasındaki problemlerin giderilmesinde belki de en önemli araçtır. Bulanık mantık sistemler oluşturulana kadar günümüz matematiğinde bu dile büyük oranda dokunulmamıştır [56]. Aslında günlük hayatta kullandığımız birçok terim bilgisayarlarda kullanılan klasik ikili sistem düşünüldüğünde genel anlamda bulanık bir yapıya sahiptir. Örneğin odamızdaki bir kapıyı düşünelim. Kapı kapalı olabilir, açık olabilir fakat insanoğlunun çok sıklıkla kullandığı başka dilsel terimler de kullanılabilir bunlar da kapının biraz açık, biraz kapalı, çok açık gibi terimlerle ifade edilmesidir [57]. Bunlar kesinlik içermeyen durumlarda insan beyninin davranışlarıdır. İşte tam da bu noktada Azerbaycanlı bilim insanı Lütfü Aliasker Zade 1965 yılında yayınladığı makalesiyle [58] bulanık mantığın temellerini matematiksel olarak atmıştır.

11.1. Bulanık Sistemlerin Gelişimi

Bulanık mantık sistemleri 1965 yılında ortaya atılmasına rağmen bu başarılı fikir ancak 1975'lerden sonra etkili olmuştur. Bu etkide büyük pay Lütfü Aliasker Zade'nin 1973 [59] ve 1975 [60] yıllarında yayınladığı iki makalesidir [57]. Zade bu makalelerinde dilsel değerleri açıklamaya çalışmıştır.

Bulanık mantığın ilk uygulaması 1974 yılında bir buhar makinesinin bulanık sistemle denetlenmesi ile olmuştur 1980 yılında Hollanda'da bir şirket çimento fırınlarının denetlenmesini bulanık mantık ile sağlamıştır. 1987 yılında IFSA kongresinde ilk bulanık mantık denetleyicileri sergilenmiştir. 1987 yılında Japon metrosunda bulanık sistemler uygulanmış ve metrolarda seyahat etmek daha konforlu hale getirilmişlerdir [61].

Bulanık mantık sistemleri fırın, tıraş makinesi, buzdolabı, şarj cihazı, klima denetimi, ısı denetimi, kredi kartı gibi sistemlerde kullanılmaktadır [61].

11.2. Bulanık Mantık Sistemlerinin Avantajları

Bulanık mantık uygulamaları ısı, elektrik akımı, sıvı, gaz denetimi, kimyasal ve fiziksel süreç denetimlerinde kullanılmaktadır.

Bulanık mantık yaklaşımı uygulanırken öncelikle sorunun özellikleri tanımlanır. Kullanışlı bir kullanıcı ara yüzü vardır. Bulanık denetimin kullanıldığı sistemler klasik yöntemlere göre daha hızlı hesaplama yapar ve daha hızlı cevap oluşturmaktadır. Matematiksel modele de ihtiyaç duymazlar [61] [62].

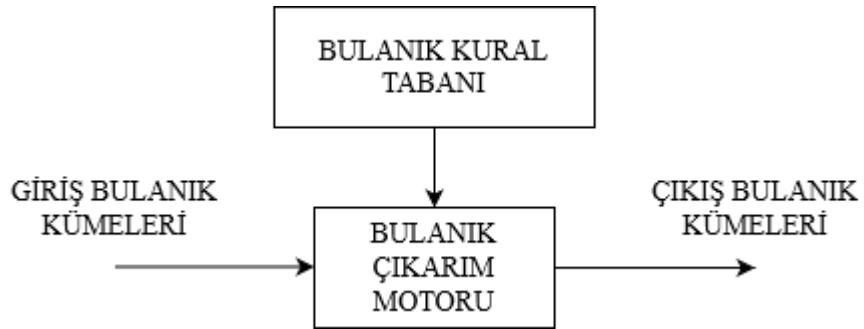
11.3. Bulanık Küme Kuramı

Klasik kümelerde bir eleman o kümenin ya elemanı olacaktır ya da elemanı olmayacaktır. Üyelik değeri 1 ise elemanı denir ve üyelik değeri 0 ise o kümenin elemanı değildir denir. Yani klasik kümelerde elemanlar ya 0 ya da 1 durumunda olurlar. Ancak gerçek dünyada sınırlar bu kadar keskin olmamaktadır.

Bulanık mantıkta küme değerleri 0 ile 1 arasında sonsuz sayıda değişebilir. Bu da bulanık kümelere esneklik sağlamaktadır. Bu esneklik sayesinde çeşitli hesaplamalarla birlikte bulanık kümeler doğal dilsel terimlerle de ifade edilmiştir denilebilir.

11.4. Bulanık Sistem Nedir?

Bulanık sistemler bir dizi girişin çıkışa dönüştürülerek sistemlerin kontrol edilmesini sağlayan denetleyicilerdir. Şekil 11.1'de bu denetleyiciler blok şema halinde gösterilmiştir.



Şekil 11.1 Bulanık Sistemin Genel Modeli

Şekil 11.1'de gösterilen her birim farklı ancak birbiriyle ilişkili işler yapan birimlerdir.

Genel bilgi tabanı biriminde veriler sayısal veya sözel olabilmektedir. Veri tabanı olarak işlevi vardır. Girdiye dair tüm bilgileri içerir.

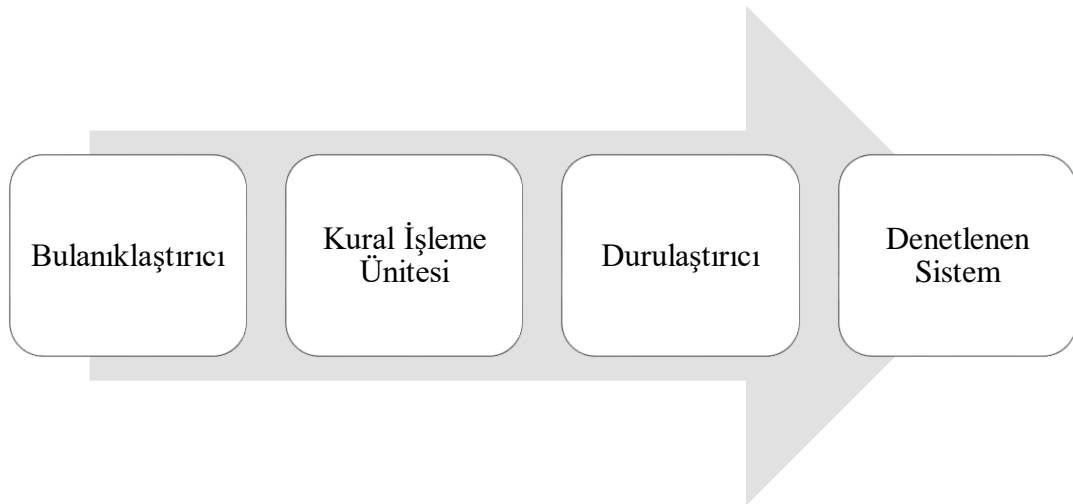
Bulanık kural tabanı birimi girişleri çıkışa bağlayan eğer-ise mantık türünde yazılabilen her bilgiyi kapsar. Düşünülen tüm kurallar bu veri tabanında mantıksal bir zemine oturtulur.

Bulanık çıkarım motoru birimi, bulanık kural tabanında giriş ve çıkış bulanık kümeleri arasında kurulmuş olan ilişkilerin hepsini bir araya toplayarak sistemin bir çıkışlı davranmasını sağlayan işlemlerin toplandığı alandır. Girdilere karşın ne tür çıktılar verileceğinin belirlenmesine yarar.

Çıktı birimi, Bilgi ve bulanık kural tabanlarının bulanık çıkarım motoru aracılığıyla etkileşimi sonucunda elde edilen çıktı değerleridir [63].

11.5. Bulanık Sistem Modellemesi

Bulanık sistemler modellenirken dört ana parçadan oluşurlar. Bunlar bulanıklaştırıcı, kural işleme ünitesi, durulaştırıcı, denetlenen sistem olarak verilebilir. Şekil 11.2’de bu aşamalar sıralı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 11.2 Bulanık sistem modellemesi

11.5.1. Bulanıklaştırıcı (Fuzzifier)

Bulanıklaştırma, sisteme verilen kesin girişleri bulanıklaştırarak işleme başlar. Giriş değerini bulanık sistemde önceden belirlenen kümelere ne derecede üye olduklarını belirler. Örneğin x girişinin Pozitif büyük (PB) ve pozitif küçük (PK) kümelerinden e derecede üye oldukları Eş. 11.1'deki gibi gösterilebilir.

$$\mu_{PB}(x) \text{ ve } \mu_{PK}(x) \quad (11.1)$$

11.5.2. Kural İşleme Ünitesi

Bulanıklaştırıcıdan gelen üyelik fonksiyonları burada depolanmış halde bulunan bilgi tabanına dayalı bilgi kümeleri ile birlikte kullanılarak bulanık bir sonuç elde edilir [64].

Bu koşul cümlelerinin her biri bir kural olarak isimlendirilir. Bu nedenle de bilgi tabanı yerine kural tabanı (rule-base) terimi de kullanılır.

$$\begin{aligned} & \text{Kural 1 if } (x \text{ is } NO_x) \text{ and } (y \text{ is } PO_y) \text{ then } (z \text{ is } NO_z) \text{ else} \\ & \text{Kural 2 if } (x \text{ is } NO_x) \text{ and } (y \text{ is } SS_y) \text{ then } (z \text{ is } SS_z) \text{ else} \\ & \text{Kural 3 if } (x \text{ is } NB_x) \text{ and } (y \text{ is } SS_y) \text{ then } (z \text{ is } PB_z) \text{ else} \end{aligned} \quad (11.2)$$

Eş. 11.2'de gösterilen NO, PO, SS, NB, PB sırasıyla negatif orta, pozitif orta, sıfır, negatif büyük, pozitif büyük bulanık sözlerini temsil etmektedir. Eş. 11.2 kısaca Eş. 11.3'teki gibi ifade edilirse,

$$\mu(z) = \min[\mu(x) , \mu(y)] \quad (11.3)$$

yazılabilir. Bu ilişki aslında X ve Y arasındaki ilişkiyi temsil eder ve Kartezyen çarpım olarak Eş. 11.4'teki gibi yazılır

$$Z = X \times Y \quad (11.4)$$

Dolayısıyla Eş. 11.4, X ve Y uzayları arasındaki bulanık ilişkiyi verir. Bulanık ilişkiler genellikle tablolar ile gösterilir.

11.5.3. Durulaştırıcı

Bulanık işlemcinin son elemanı olarak devreye girer. Bulanık kural işleme ünitesinde elde edilen kural sonuçları durulaştırıcıda değerlendirilip, kesin bir sonuca dönüştürülür.

Kuralların toplam etkisi vardır ve bu da Eş. 11.5'teki gibi gösterilir.

$$K_T = K_1 + K_2 + K_3 \dots + K_N = \sum_{i=1}^n K_i \quad (11.5)$$

Eşitlik üstte + işareti toplama işlemi olmayıp 'else' terimine karşılık gelmektedir. Buradaki etkisi ise birleşim yani maksimumunu alma işlemidir.

Dolayısıyla,

$$K_T = \mu_{NO}(z) \vee \mu_{SS}(z) \vee \mu_{PO}(z) \vee \mu_{PB}(z) \quad (11.6)$$

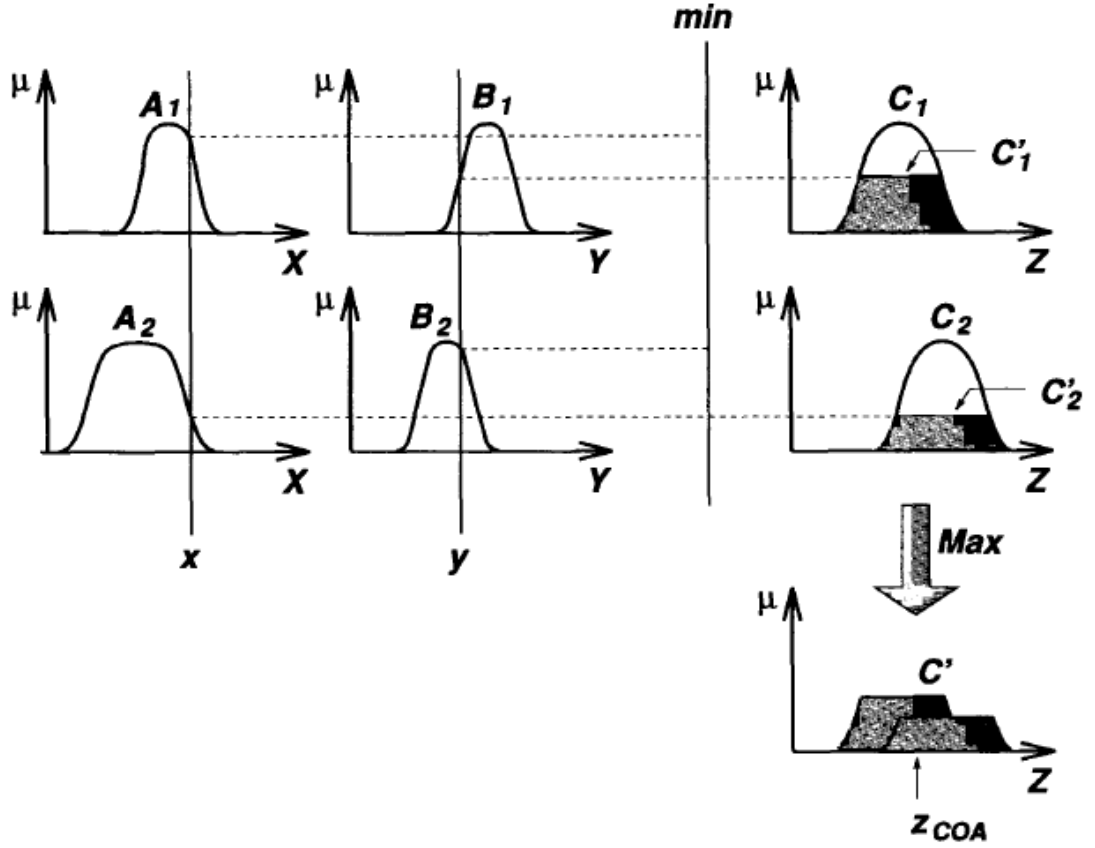
Yazılabilir. Eş. 11.6 açılırsa Eş.11.7'deki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned} \mu_T(z) &= [\mu_{NO}(x) \wedge \mu_{PO}(y)] \vee [\mu_{NO}(x) \wedge \mu_{SS}(y)] \\ &\vee [\mu_{NB}(x) \wedge \mu_{PO}(y)] \vee [\mu_{NB}(x) \wedge \mu_{SS}(y)] \\ \mu_T(z) &= MAX\{MIN[\mu_{NO}(x), \mu_{PO}(y)], MIN[\mu_{NO}(x), \mu_{SS}(y)], \\ &MIN[\mu_{NB}(x), \mu_{PO}(y)], MIN[\mu_{NB}(x), \mu_{SS}(y)]\} \end{aligned} \quad (11.7)$$

elde edilir, bu ifade ise Eş. 11.8'de gösterildiği gibi

$$\mu_T(z) = MAX\{MIN[\mu(x), \mu(y)]\} \quad (11.8)$$

şeklinde kısaltılabilir. Bu da kuralların işlemesi ile elde edilen sonuç kümelerinden en yüksek üyelik derecesine sahip olan kümenin sonuç kümesi olduğu anlamına gelir.



Şekil 11.3 Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi [65]

Şekil 11.3, iki kurallı bir Mamdani bulanık çıkarım sisteminin, iki kesin girdi x ve y 'ye tabi tutulduğunda toplam z çıktısını nasıl türettiğini gösteren bir çizimdir.

Durulaştırma, bulanık bir kümeden kesin bir değerin temsili bir değer olarak çıkarılmasını ifade eder [66]. Durulaştırmada çeşitli yöntemler kullanılmaktadır bunlardan birisi ağırlık merkezi yöntemidir. Mamdani yönteminde en çok tercih edilen metotlardan birisidir. Geometrik ağırlık merkezi Eş.11.9'da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$y_{merkez} = \frac{\int \mu(y)ydy}{\int \mu(y)dy} \quad (11.9)$$

Bir diğler yöntem ağırlıklı ortalamadır. Her bir kuraldan alınan üyelik değeri bu değerin çıkış kümesinde keştiğı alanla çarpılır. Bu çarpımların toplamının bütün kurallardan alınan üyelik değelerinin toplamına oranı bize ağırlıklı ortalamayı verir. Eşitlik 11.10'da gösterilmiştir. Toplam kural sayısı n ile ifade edilmiştir [67].

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(y_i) \times y_{alan}}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)} \quad (11.10)$$

Üçüncü yöntem alan merkezi yöntemidir. En büyük üyelik değerini veren çıkış değerleri için uygulanır. Ortaya çıkan değere alan merkezi denilir. Eşitlik 11.11 ile gösterilir.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(y_i) \times y_i}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)} \quad (11.9)$$

En büyüklerin en küçüğü ve en büyüğü yöntemi, çıkış aralığı üzerinde üyelik derecesine göre bir değeri seçildiğı için matematiksel işleme gerek duyulmaz.

Bir diğler yöntem olarak en büyüklerin ortalaması yöntemi önceki yöntemle benzerdir. En büyük üyelik değerini veren çıkış değerlerinin ortalaması hesaplanır.

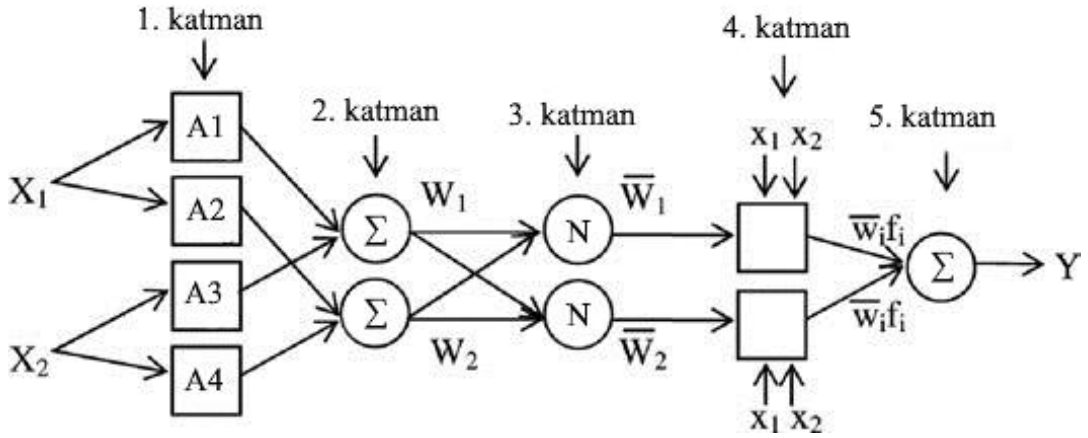
11.5.4. Denetlenen Sistem

Bulanık sistem tarafından denetlenen yani kontrol edilen sistemdir. Sisteme uygun hazırlanan bulanık mantık denetleyicilerle denetlenir ve uygun çıktı değeri oluşturur. Kontrolcüsü uzman birileri tarafından hazırlanmalıdır. Denetlenen sistem çıkışından alınan geri besleme ile referans değerler karşılaştırılıp denetlemenin doğrulaması yapılabilir. Referans değeriyle denetlenen sistem çıkışı arasındaki hatanın en az olması istenir.

12. UYARLAMALI AĞ TABANLI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ (ANFIS)

Yapay zekâ denildiğinde akla hemen yapay sinir ağları gelmektedir. Yapay sinir ağlarının son yıllarda popüler olması dolayısıyla iki terim birbirinin yerine kullanılıyor dahi olabilir. Ancak kısa bir araştırma ile bu iki terimin aynı olmadığı ve yapay sinir ağlarından farklı diğer yapay sistemleri bulunduğu da anlaşılacaktır. İşte ANFIS tam da buna örnek olarak verilebilir. Sistem modeli şekil 12.1 ile gösterilmiştir.

ANFIS Jang tarafından 1990'ların başlarında geliştirilmiş olup doğrusal olmayan fonksiyonların modellenmesinde ve kaotik zaman serilerinin tahmininde kullanılmıştır [68]. Bu metodun temelinde Takagi-Sugeno-Kang çıkarım sistemi bulunmaktadır [69]. Üyelik fonksiyonlarını en iyi şekilde ayarlayarak hata çıkışını minimuma indirmeyi hedefler.



Şekil 12.1 ANFIS Mimarisi [70]

ANFIS, verilen girdilerle çıktılarının uygunluğunu en iyi biçimde sağlarken geri beslemeli eğitim inmesi (gradient descent) ve en küçük kareler yaklaşımını kullanır. Girdi ve çıktı arasındaki bulanık kural tabanı ve üyelik fonksiyonlarının değerlerini göz önünde bulundurarak kendiliğinden bir ayar verilmesini sağlar. Böylelikle verilen giriş değerlerine karşılık sonuç değerleri üretmiş olur.

ANFIS uygulamalarında girdilerin alt bölümlere ayrılarak üyelik fonksiyonları atanması sayesinde en uygun çıkarım sistemini temin etmeye yarar. Kullanılan metod bölümler halinde açıklanacaktır.

Bulanık kontrol sistemi Sugeno tipinde olduğu için j. kural Eş. 12.1'deki gibi olmaktadır.

$$K^j: E\check{G}ER x_1 A_1^j VE x_2 A_2^j VE \dots VE x_n A_n^j İSE f_j = a_0^j + a_1^j x_1 + \dots + a_n^j x_n \quad (12.1)$$

Burada x'ler girdi değişkenleri, y çıktı değişkenini, A'lar sözel üyelik değerlerini göstermektedir. Bu metot yapay sinir ağları tabaka yöntemine de benzemektedir. Açıklanacak olursa sırasıyla şöyle anlatılabilir.

Katman 1'de her düğüm noktası birer giriş noktasıdır ve katmanlar arası bağlantı da vardır.

Katman 2'de her düğüm bir üyelik fonksiyonuna karşılık gelir. $\check{u}_{A^j}(x_i)$ genel olarak bir çan eğrisi şeklinde seçilir. Aşağıda Eş. 12.2'de gösterilmiştir.

$$\check{u}_{A^j}(x_i) = \frac{1}{1 + \left\{ \left[\frac{x_i - m_i^j}{\sigma_i^j} \right]^2 \right\} b_i^j} \quad (12.2)$$

Burada m_i^j, σ_i^j, b_i^j ayarlanması gereken parametrelerdir. Sürekli veya parçalı olarak türevi alınabilen üyelik fonksiyonları tercih edilir. Öncül parametrelerin olduğu katmandır.

Katman 3'te gelen bilgilerin çarpımının olduğu şekil 12.1'de gösterilmiştir. Çarpım bir diğer katmana iletilir.

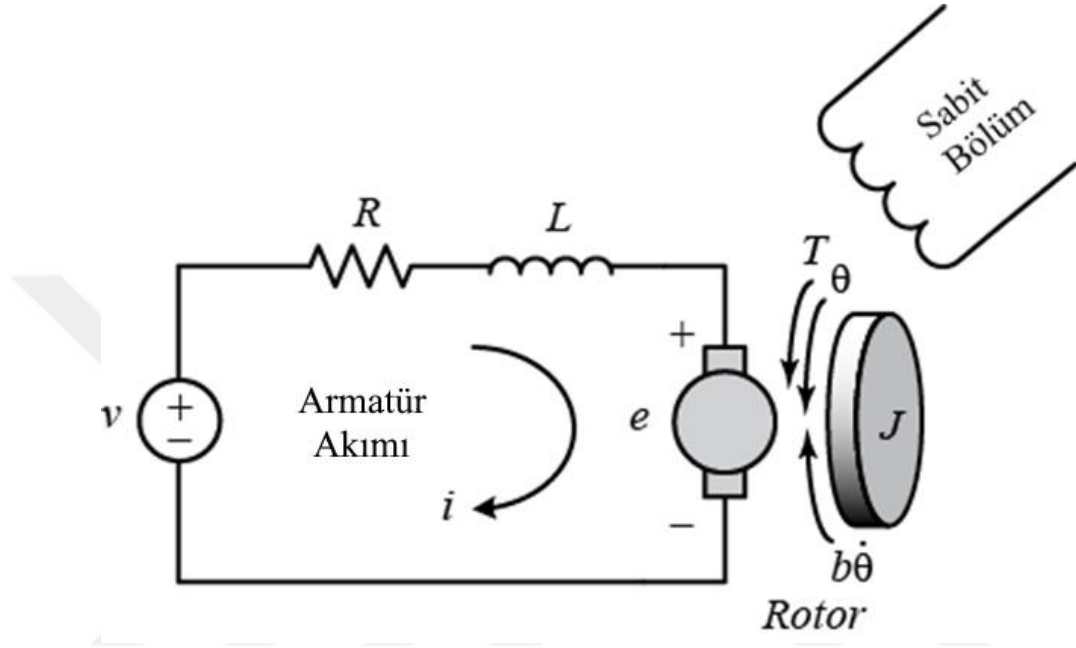
Katman 4'te her bir düğüm noktası N ile kullanılmıştır ve bir kuralın normalleştirilmiş tetikleme kuralını gösterir. Örneğin j. düğümün tüm kurallara göre tetiklenme oranını gösterir.

Katman 5'te ağırlıklı hesaplamalar yapılır.

Katman 6'da tüm sinyallerin toplandığı alan vardır diyebiliriz. Y ile gösterilir. Sonuç bu katmandan izlenir [63].

13. DC SERVO MOTOR SIMULINK MODELİ

DC motorlar kontrol sistemlerinde sıklıkla kullanılan tahrik makinelerindedir. Sistemde direkt olarak dönme hareketinin alınmasında önemli görevleri vardır. Dişlileri, kasnakları ve diğer parçalarıyla doğrusal hareketi sağlarlar [47].



Şekil 13.1 DC Motor Elektriksel Modeli

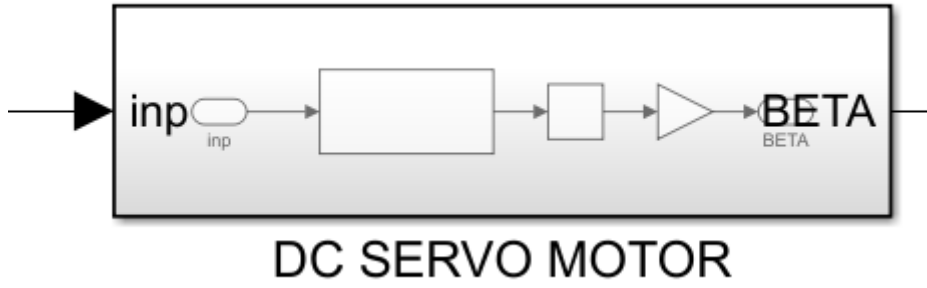
DC motorun elektriksel modeli şekil 13.1’de görüldüğü üzere direnç, bobin ile ifade edilmektedir. Şekil 13.2’de DC motorun Simulink gösterimi verilmiştir.

T motor torku, i endüvi akımı ile K_t ’nin çarpımına eşittir. İndüklenen gerilim (e) de dönme hızıyla ilişkilidir. Eş. 13.1 ve 13.2’de bu durumlar gösterilmiştir.

$$T = K_t i \quad (13.1)$$

$$e = K_e \dot{\theta} \quad (13.2)$$

SI birim sistemlerinde K_t (endüvi sabiti), K_c ’ye (motor sabit) eşit olacaktır. Eş. 13.1 ve Eş. 13.2 kullanılarak Eş. 13.3 ve Eş. 13.4 denklemleri elde edilir.



Şekil 13.2 DC Motor Simulink Modeli Gösterimi

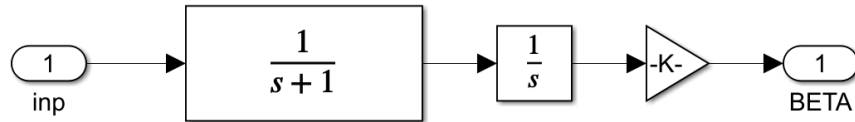
$$J\dot{\theta} + b\ddot{\theta} = Ki \quad (13.3)$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - K\dot{\theta} \quad (13.4)$$

Gerekli Laplace dönüşümleri yapıldıktan sonra aşağıdaki transfer fonksiyonu elde edilir. Bu fonksiyon Eş. 13.5'te gösterilmiştir.

$$TF = \frac{K}{Js+b} \quad (13.5)$$

Burada J zaman sabiti olarak da isimlendirilebilir.



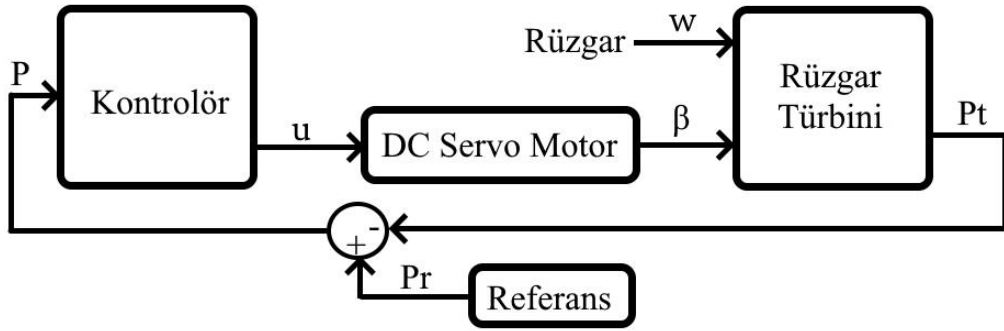
Şekil 13.3 DC Motor Modelinin iç blokları

DC servo motor iç yapısı şekil 13.3'te gösterilmiştir.

14. YÖNTEM

Rüzgâr türbinlerinde kanat açısının kontrolü gelişen rüzgâr türbinleri ile artmaktadır. Rüzgâr türbinleri geliştikçe daha da yaygınlaşacak ve üzerine daha çok düşünülecektir. Bu çalışmada, değişken hızlı rüzgâr türbininin kanat açısı kontrol edilerek çıkışta düzgün bir güç karakteristiği elde edilmek istenmiştir.

Yapılan çalışmalar sırasıyla PID kontrol, bulanık kontrol ve uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolörler başlıklar halinde sıralanmıştır. Her bir kontrolörün tasarimsal çıktıları ilgili bölümlerde verilecektir. Sonuç kısmında ise karşılaştırılıp hangisinin daha iyi sonuçlar verdiği yazılmıştır.



Şekil 14.1 Rüzgâr Türbini Sistemin Genel Modellenmesi

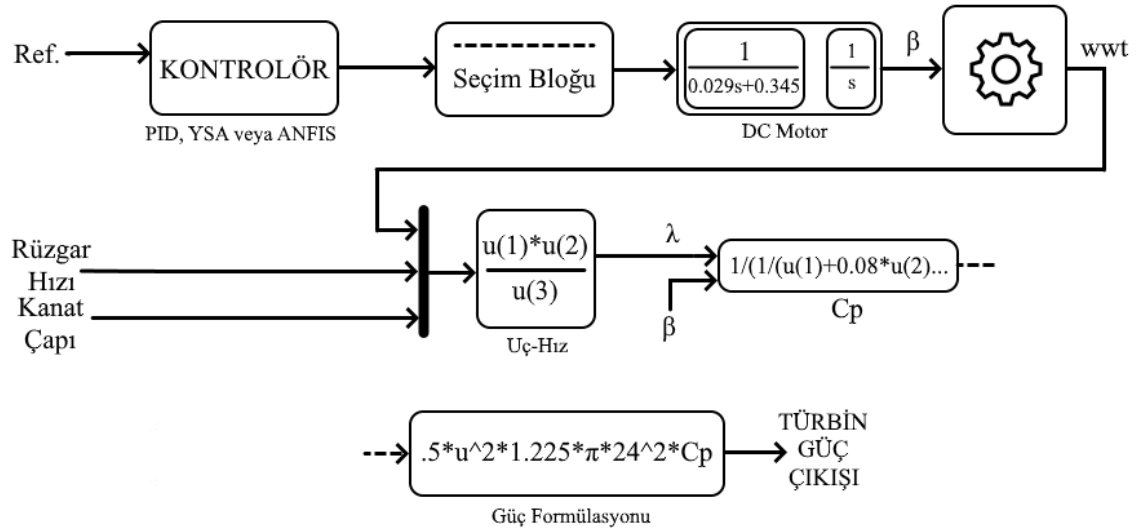
Şekil 14.1 yaptığımız çalışmanın modellenmesi blok şemalarla gösterilmiştir. Sistem kısaca şöyle anlatılabilir. Rüzgâr türbinine rüzgâr(W) ve kanat açısı sinyalleri girmektedir. Kanat açısı başlangıçta 0 olarak kabul edilmektedir. Rüzgâr türbini çıkışında türbin gücü ölçülmektedir (P_t). P_t ile referans güç (P_r) arasındaki hata değeri P ile gösterilmiştir. P sinyali kontrolörde işlenir ve kontrolör gerekli kontrol işlemlerini uyguladıktan sonra servo motora sinyal çıkışı verir. Bu kontrol sinyali u ile gösterilmiştir. Kontrol sinyali servo motoru kontrol eder ve sonuçta bir beta(β) değeri elde edilmiştir. Elde edilen β kanat açısını vermektedir. Nihayetinde kanat açısı rüzgâr türbinine giriş olarak verilmiş ve sonuçta tekrar güç ölçümü yapılmıştır.

15. RÜZGAR TÜRBİNİ BLOĞU TASARIMI

Rüzgâr türbini bloğu ile rüzgâr türbininden elde edilen güç hesaplanır. Gücün hesaplanması için çeşitli bloklar kullanılmıştır. Öncelikle şekil 15.1’de görülen sistemin ana amacı türbinin güç çıkışını bulmaktır. Türbinin güç çıkışı kontrolör, Cp bloğu, Uç-hız bloğu ve seçim bloğu gibi çeşitli bloklar sayesinde hesaplanır. Bu blokların her birinin ayrı bir işlevi vardır ve MATLAB/Simulink ortamına uygun bir biçimde hazırlanmıştır. Kullanılan bloklar Simulink arayüzü kullanılarak hazırlanmıştır. Library browser uygulaması ile hazır bloklara erişim sağlanmıştır.

Kontrol bloğuna gelen referans ve türbin çıkışı arasındaki farka, istenen değer ve sistemin çıkışı arasındaki fark da denebilir. Bu fark kontrolör bloğuna hata sinyali olarak girdi şeklinde verilir. Bu girdi sayesinde kontrolör sistemi farkın ne kadar büyük olduğuyla ilgilenecek çıkışta bir kontrol sinyali üretmektedir. Bu anlatılanlar kontrolörümüz PID, YSA veya ANFIS kontrolör olsa bile mantık olarak bu şekilde işlemektedir.

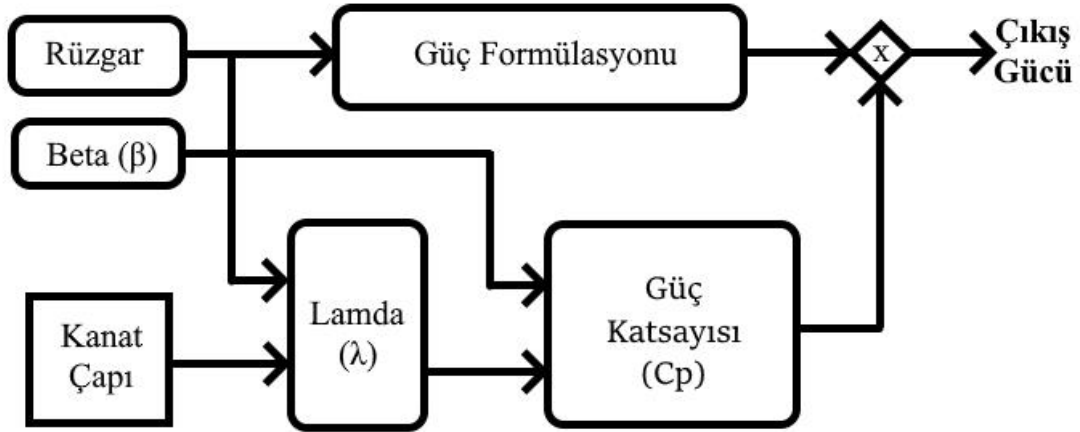
Kontrolör bloğundan çıkış olarak elde edilen kontrol sinyali seçim bloğuna gider. Seçim bloğunda rüzgâr türbini sisteminin ne zaman kontrol edileceği ile ilgili bir seçim bloğu işlevi gören sistem vardır. Seçim bloğu kontrol sinyaline otomatik olarak izin verir ve sinyal bloğunun geçişi sağlanırsa. Bu sinyal DC motor bloğuna ulaşır.



Şekil 15.1 Sistem ayrıntılı blok şeması

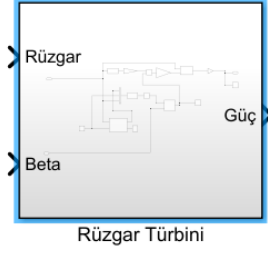
DC motoru bloğunda amaç gelen kontrol sinyaline göre bir kanat açısı sinyali oluşturmaktır. RES'lerin kontrol edilmesinde önemli bir sinyali üretmektedir. DC motorunda üretilen açı sinyali rotor hızını hesaplamak için ilerler ve sonuçta hesaplanan hızla beraber uç-hız oranı hesaplamak için uç-hız oranı bloğuna girer. Uç-hız oranı bloğunda giriş olarak rüzgâr hızı, kanat açısı ve kanat çapı kullanılmaktadır. Daha sonra uç-hız oranı ve beta değerleri güç katsayısının hesaplanması için C_p bloğuna ilerler. C_p bloğunda elde edilen güç katsayısı ise güç formülasyonunda rüzgâr türbini çıkış gücünün hesaplanması için yerine yazılır. Sonuçta güç çıkışı hesaplanır ve bu döngü böyle devam eder.

Rüzgâr türbini bloğu Matlab/Simulink programıyla tasarlanmıştır. Rüzgâr türbini bloğunun genel yapısı şekil 15.3 ile gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere türbin çıkışı güç, girişleri ise rüzgâr ve beta olmak üzere 2 girişlidir. Şekil 15.2'de ise rüzgâr türbini iç yapısının genel blok şeması verilmiştir.



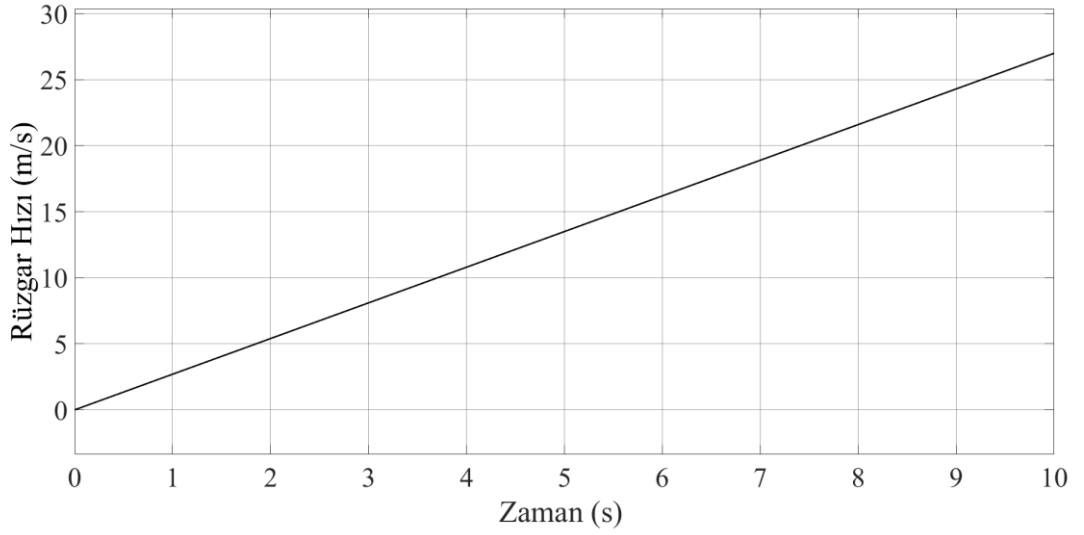
Şekil 15.2 Rüzgâr Türbini Bloğunun İç Yapısı

Türbin bloğuna giren rüzgâr hızının grafiği şekil 15.4'teki gibidir. Doğrusal olup zamanlar artmaktadır.



Şekil 15.3 Rüzgâr Türbini Genel Gösterimi Bloğu

Rüzgâr türbinin iç yapısı ise şekil 15.5'te gösterildiği gibidir. Burada değişen kanat çapı ile zamanla değişen bir diğer parametre olan rüzgâr hızı bir dizi işlemlerden geçirilerek çıkışta güç elde edilmektedir.



Şekil 15.4 Rüzgâr Hızı Grafiği

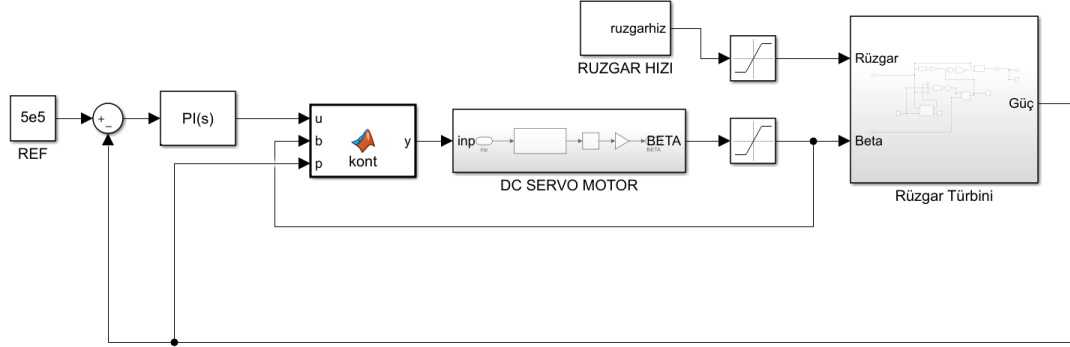
$$Cp(\lambda\beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda i}} + 0.0068\lambda$$

$$\frac{1}{\lambda i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{3\beta + 1} \right) \tag{15.3}$$



16. PID KONTROLÖR TASARIMI

PID, oransal integral ve türevsel kazancı ifade eder. Sistem hatasının bu kazançlarla ayarlanması ile sistem cevabı düzeltilmeye çalışılır.



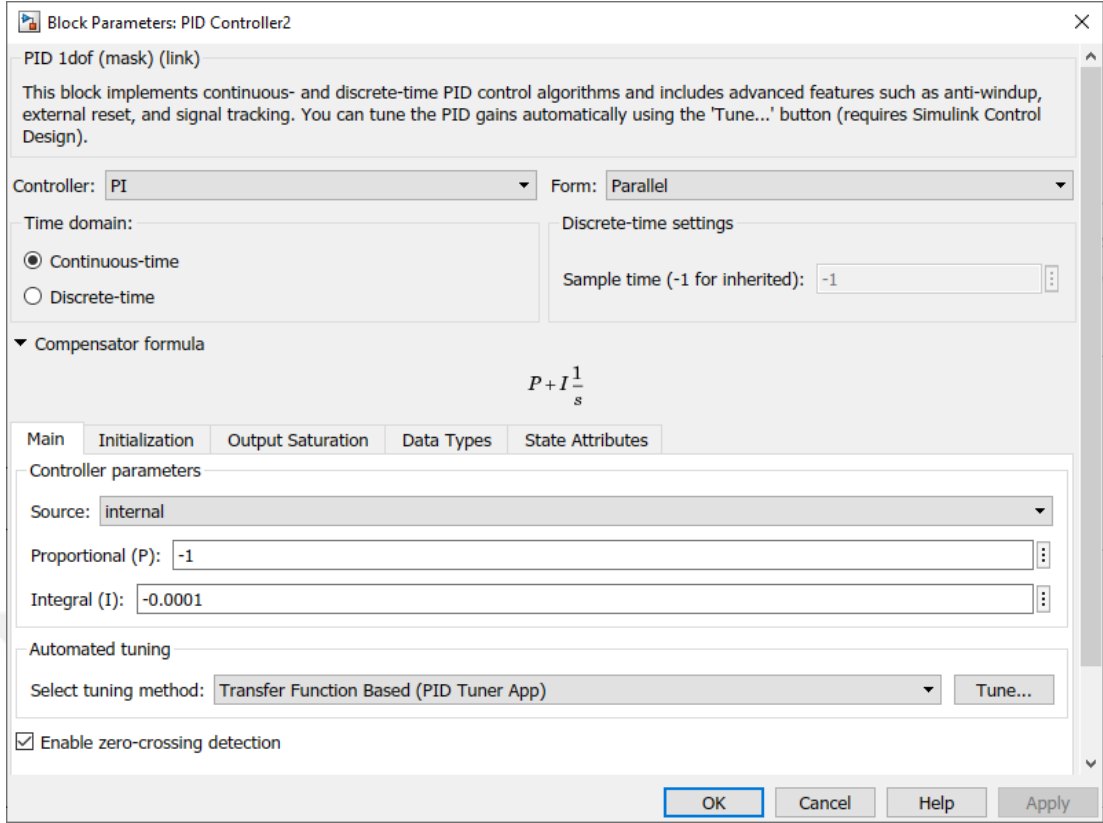
Şekil 16.1 PID Kontrolör ile Rüzgâr Türbini Tasarımı Blok Gösterimi

Bu çalışmada PID kontrolör tasarımı Matlab/Simulink kullanılarak yapılmıştır. PID kontroler bloğu kullanılmıştır. Sistemin modellenmesi şekil 16.1'deki gibidir. Türbin güç çıkışı ile referans değerimizi karşılaştırdık ve oluşan hatayı kontrolden geçirerek DC servo motoru kontrol eden bir sinyal ürettik. DC servo motor çıkışında ise kanat açısı derece olarak türbin bloğuna gönderilmektedir.

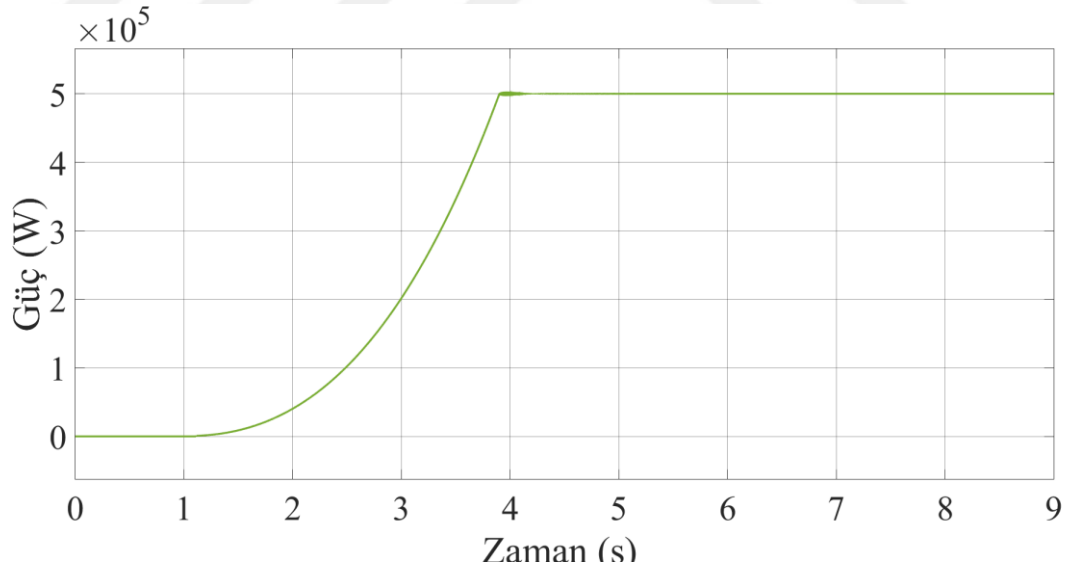
PID kontrolörde kullanılan kazanç oranları Çizelge 16.1'de verilmiştir [36]. PID kontrolör blok şeması parametreleri şekil 16.2'de görüldüğü gibidir. PID kontrolör ile kontrol edilen rüzgâr türbini güç çıkışı şekil 16.3 ve şekil 16.4'te görüldüğü gibidir.

Çizelge 16.1 PID Kontrolör Katsayıları

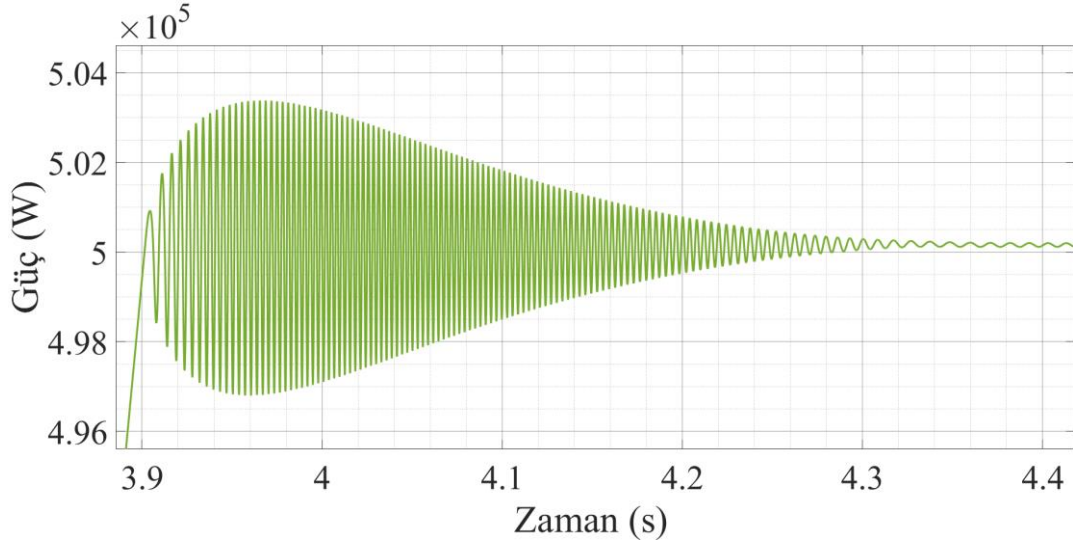
Oransal Kazanç, P	İntegral Kazanç, I
-1	-0.0001



Şekil 16.2 PID Parametreleri



Şekil 16.3 PID Kontrolör Güç Çıkışı



Şekil 16.4 PID Kontrolör 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı

16.1. Diğer PID Çalışmaları ve Sonuçları

Çalışmada sonuçları gözlenen başka PID simülasyonları da yapılmıştır. Yapılan simülasyonlar MATLAB/Simulink kullanılarak hazırlanmışlardır. Deney düzeneği aynı olmakla beraber DC motoru kontrol eden PID controller bloğunun oransal ve integral kazanç değerlerinde değişiklik yapılmıştır. Yapılan bu değişiklikler kontrolöre gelen, referans değer ile sistemin çıkış değeri olan hata sinyalini kontrol etmiştir. Bu değişikliklerle beraber kontrolör çıkış sinyali olarak adlandırılan kontrol sinyalinde ve sistem çıkışında değişimler gözlenmiştir.

Çizelge 16.1 PID katsayıları

	K_p	K_i
1	-1.005	-0.002
2	-1.0049	-0.003
3	-1.01	-0.0001
4	-1.01	-0.000001
5	-0.9	-0.00001
6	-0.8	-0.00001

Değişimlere neden olan kazançlar bir diğer adıyla katsayılar Çizelge 16.1’de sırayla verilmiştir. PID Controller bloğuyla sistemi kontrol eden kontrolör bloğunun oransal kazancı ve integral kazancı değiştirilmektedir.

Yapılan katsayı değişimleri PID kontrollerin özellikleri göz önüne alınarak yapılmıştır. Kazançlar sıfırın altında değiştirilmiştir. En iyi değeri de sıfırın altındaki değerlerde vermişlerdir. Oransal kazanç değeri arttırılarak yükseliş zamanı azaltılmış ancak aşımaların arttığı görülmüştür. İntegral katsayısı arttırılarak aşım artmış sağlamlık da artmıştır.

Çizelge 16.2 PID karakteristik değerleri

	TEPE DEĞERİ	AŞMA ORANI
1	503764	%7.5
2	504456	%8.9
3	503343	%6.6
4	503124	%6.25
5	503279	%6.5
6	503441	%6.9

Referans değerinin 500.000 W olduğu göz önüne alındığında Çizelge 16.2’de tepe değerlerinin referans değere göre ne kadar aştığı hesaplanabilir. Bu değerler Çizelge 16.2’de aşma oranı olarak yüzde olarak gösterilmiştir. Sinyal değerleri linear ilerlememektedir. Tepkileri çeşitli olmuştur.

17. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KANAT AÇISI KONTROLÖR TASARIMI

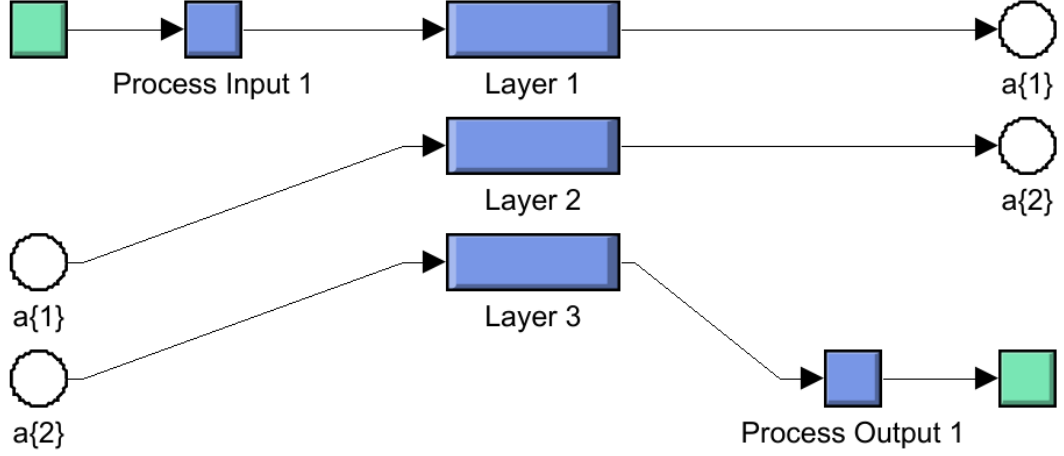
Yapay Sinir Ağları diferansiyel denklemler ile çözülemeyen ve bir nevi insana mahsus olan özelliklerin çözümünü sağlayabilen matematiksel sistemlerdir. Bu matematiksel sistemlerin istenilen sonuçları verebilmesi için uygun giriş değerleri verilmelidir. Giriş verilerimizi elde ettikten sonra bu değerleri bir derleyicide derledik ve yapay sinir ağımızın anlayabileceği uygun forma getirdik daha sonra Matlab üzerinden yapay sinir ağı aracımızı çağırdık.

Matlab yapay sinir ağı oluşturma ve eğitime uygulaması ile çeşitli aktivasyon fonksiyonu, katman sayısı, eğitim fonksiyonu adım değeri (epochs) sayılarına sahip birden fazla yapay sinir ağı oluşturduk ve eğittik. Bu simülasyonlar Çizelge 17.1’de verilmiştir.

Bu çalışmada Matlab uygulamaları kullanılarak YSA sistemimiz eğitilmiştir. Toplam 4 adet yapay sinir ağı simülasyonda eğitilmiştir. 4 adet sonuç da birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Simülasyonlarda yapay sinir ağlarında eğitmek üzere kullanılan toplam giriş değeri sayısı 90014 adettir. Çizelge 17. 2’de gösterilen deneylerin her birinde aynı adet giriş değeri kullanılmıştır. Yapay sinir ağı çıkışları Microsoft Excel’de düzenlendikten sonra tekrar sisteme entegre edilmiştir.

Simülasyonlarda kullanılan yapay sinir ağlarının tipi her zaman geri beslemeli yapay sinir ağıdır. Geri beslemeli yapay sinir ağı öğretmenli bir ağıdır. Öğrenme fonksiyonu (learning function) olarak Levenberg-Marquardt geri besleme fonksiyonu (trainlm), esnek geriyayılım fonksiyonu (trainrp) veya momentum ve uyarlanabilir öğrenme oranı geri yayılımlı gradyan inişi fonksiyonu (traingdx) seçilmiştir.



Şekil 17.1 Çalışmada Kullanılan Yapay Sinir Ağları Genel Modellemesi

Deneylerde oluşturulan yapay sinir ağlarında Şekil 17.1’de görüldüğü gibi 3 adet katmanlı ağlar tercih edilmiştir. Katman sayısı azaldığında sonuçlar daha iyi olabilmektedir. Hepsinin çıkış katmanında 1 adet hücre ve aktivasyon fonksiyonu olarak da purelin seçilmiştir. Purelin doğrusal bir çıkış vermektedir. Ağlarda kullanılan performans fonksiyonu ortalama hata karesidir (MSE). Ortalama hata karesi Eş. 17.1’de gösterildiği gibidir.

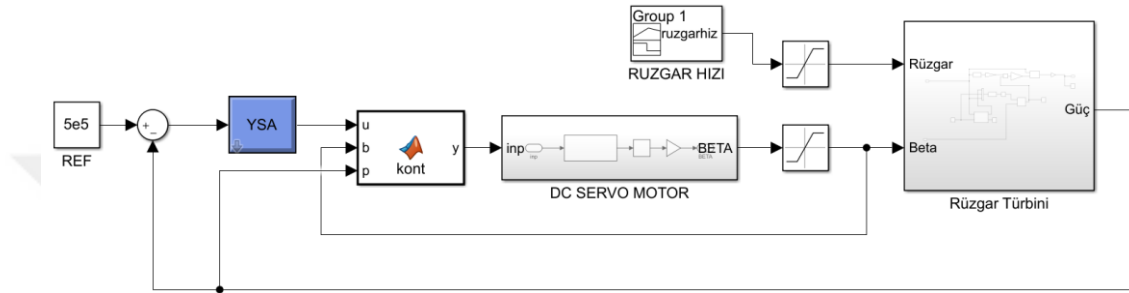
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2 \quad (17.1)$$

MSE tahmin edilen değerler ile gerçek değer arasındaki ortalama karesi alınmış farkı ölçer. MSE, karesi alınmış hata kaybının beklenen değerine karşılık gelen bir risk fonksiyonudur [72].

Yapay sinir ağı ile tasarlanan kanat açısı kontrol sistemi Şekil 17.2’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 17.1 Yapay Sinir Ağı Ağ Modelleri

ADI	KATMAN SAYISI	EĞİTİM FONKSİYONU	AKTİVASYON FONKSİYONU	EPOCHS
YSA11	3	traingdx	logsig- purelin	2500
YSA6	3	trainlm	tansig - purelin	10000
YSA2	3	trainlm	tansig - purelin	7300
YSA3	3	trainlm	logsig- purelin	7367



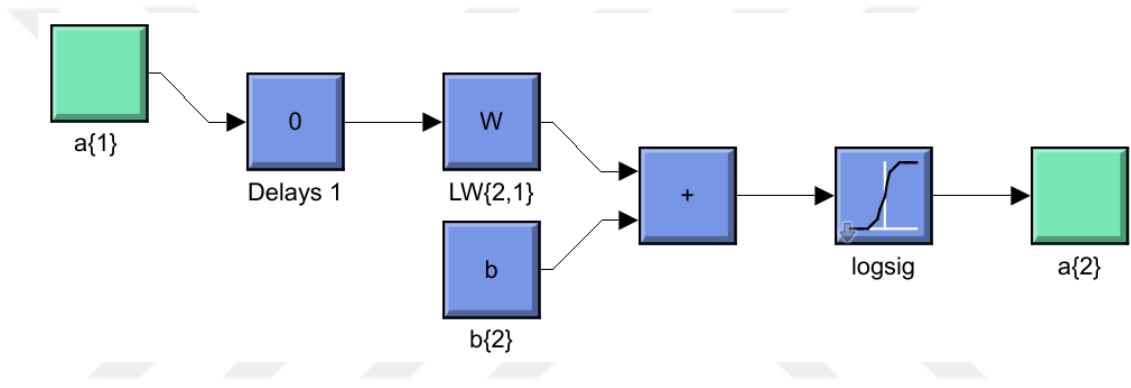
Şekil 17.2 Yapay Sinir Ağı Kontrolörü ve Rüzgâr Türbini Tasarımı

Çizelge 17.2 Yapay Sinir Ağı Modelleri Katmanlarda Bulunan Hücre Sayıları

ADI	GİRİŞ KATMANI HÜCRE SAYISI	GİZLİ KATMAN HÜCRE SAYISI	ÇIKIŞ KATMANI HÜCRE SAYISI
YSA11	9	9	1
YSA6	9	9	1
YSA2	10	11	1
YSA3	5	5	1

17.1. YSA 11

Bu çalışmada yapay sinir ağları ile kontrolör oluşturulurken 3 katmanlı bir sistem modellenmiştir. Modellenen bu ağın giriş katmanı hücre sayısı 9, gizli katman sayısı 1 olup gizli katmandaki hücre sayısı 9, çıkış katmanı ise hücre sayısı ise 1 olarak seçilmiştir. Katmanlarda çeşitli aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Katmanlarda elde edilen toplamların çıkışını hesaplamak için logsig aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Ancak 16. Bölümde de belirtildiği üzere çıkıştaki toplamın aktivasyon fonksiyonu olarak ise purelin yani doğrusal bir fonksiyon kullanılmak istenmiştir. Bu model şekil 17.3 ile gösterilmiştir.

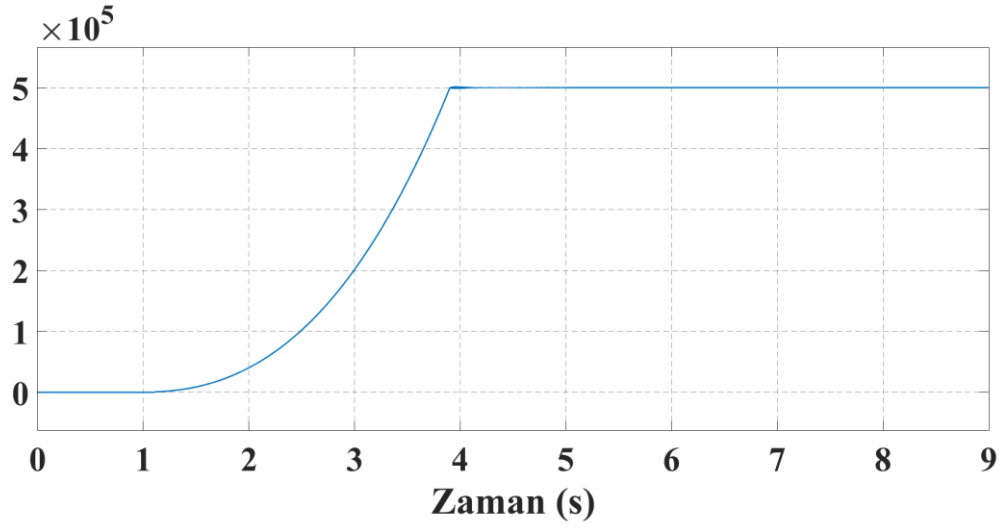


Şekil 17.3 YSA11 Deneyinin Blok Gösterimi

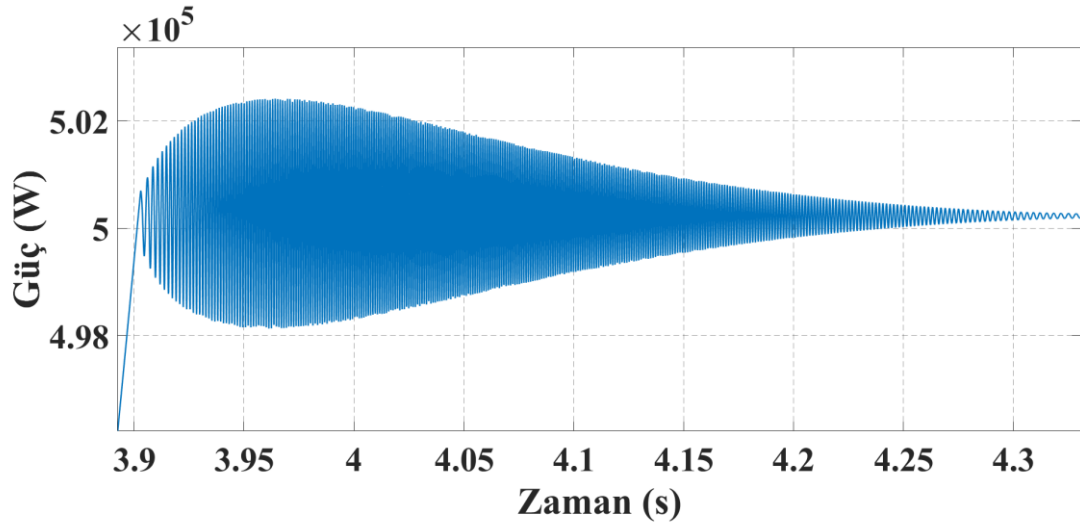
Bu ağın eğitim fonksiyonu olarak Momentum ve uyarlanabilir öğrenme oranı geri yayımlı gradyan inişi (traingdx) kullanılmıştır. Bu fonksiyon ile katmanlardaki hücreler arasındaki ağırlıklar ve katmanlardaki hücrelerin bias değerleri ayarlanmıştır.

Ağın düzgün eğitilebilmesi için adım sayısı (epochs) değeri yeterli sayıda tutulmalıdır. Bu deneyde epochs değeri 2500 seçilmiştir. Ağın ezberlemeden istenen işlevi öğrenebilmesi için seçilen epochs değeri önemlidir.

Şekil 15.3'te gösterilen rüzgâr değerinin rüzgâr türbini sistemine giriş olarak verilmesi ve bu ağ ile oluşturulan kontrolör sonucunda çıkış gücü şekil 17.4'teki ve şekil 17.5'teki gibi olmaktadır. Bu iki şekilden görüldüğü üzere güç karakteristiğimiz uygundur.



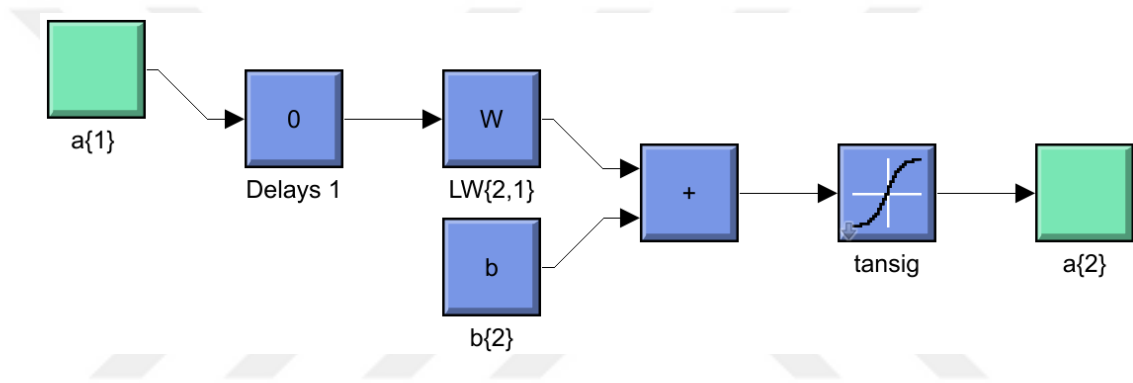
Şekil 17.4 YSA11 Deneyinin Rüzgâr Türbini Güç Çıkışı



Şekil 17.5 YSA11 Kontrolör 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı

17.2. YSA 6

Bu çalışmada yapay sinir ağları ile kontrolör oluşturulurken 3 katmanlı bir sistem modellenmiştir. Modellenen bu ağın giriş katmanı hücre sayısı 9, gizli katman sayısı 1 olup gizli katmandaki hücre sayısı 9, çıkış katmanı ise hücre sayısı ise 1 olarak seçilmiştir. Katmanlarda çeşitli aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Katmanlarda elde edilen toplamların çıkışını hesaplamak için tansig aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Ayrıca 16. Bölümde de belirtildiği üzere çıkıştaki toplamın aktivasyon fonksiyonu olarak ise purelin yani doğrusal bir fonksiyon kullanılmak istenmiştir. Bu model şekil 17.6 ile gösterilmiştir.

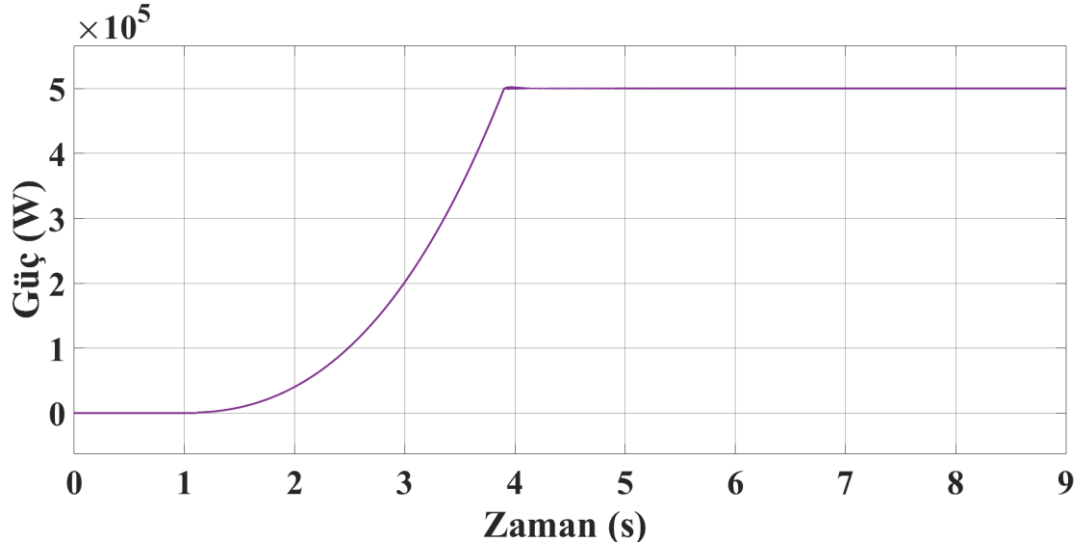


Şekil 17.6 YSA6 Deneyinin Simulink Modeli

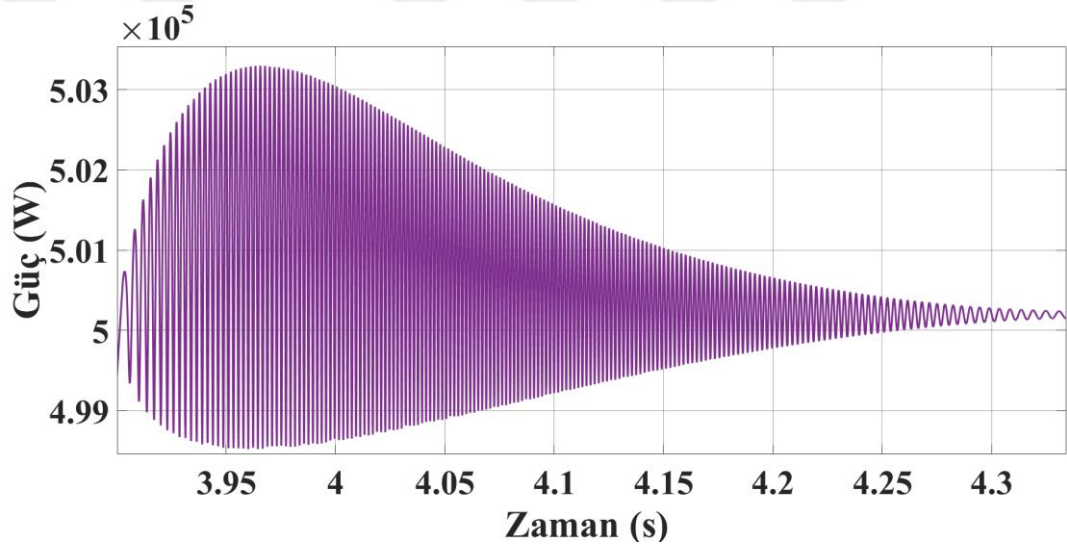
Bu ağın eğitim fonksiyonu olarak Levenberg-Marquardt geri yayılımı (trainlm) kullanılmıştır. Bu fonksiyon ile katmanlardaki hücreler arasındaki ağırlıklar ve katmanlardaki hücrelerin bias değerleri ayarlanmıştır.

Ağın düzgün eğitilebilmesi için adım sayısı (epochs) değeri yeterli sayıda tutulmalıdır. Bu deneyde epochs değeri 10000 seçilmiştir. Ağın ezberlemeden istenen işlevi öğrenebilmesi için seçilen epochs değeri önemlidir.

Şekil 15.3'te gösterilen rüzgâr değerinin rüzgâr türbini sistemine giriş olarak verilmesi ve bu ağ ile oluşturulan kontrolör sonucunda çıkış gücü şekil 17.7'deki ve şekil 17.8'deki gibi olmaktadır. Bu iki şekilden görüldüğü üzere güç karakteristiğimiz uygundur.



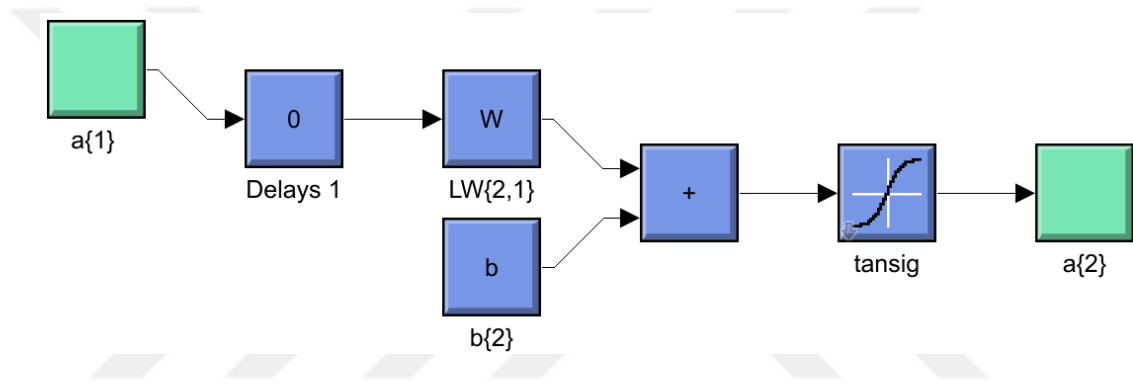
Şekil 17.7 YSA6 Deneyinin güç çıkışı



Şekil 17.8 YSA6 Kontrolör 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı

17.3. YSA 2

Bu çalışmada yapay sinir ağları ile kontrolör oluşturulurken 3 katmanlı bir sistem modellenmiştir. Modellenen bu ağın giriş katmanı hücre sayısı 10, gizli katman sayısı 1 olup gizli katmandaki hücre sayısı 11, çıkış katmanı ise hücre sayısı ise 1 olarak seçilmiştir. Katmanlarda çeşitli aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Katmanlarda elde edilen toplamların çıkışını hesaplamak için tansig aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Ayrıca 16. Bölümde de belirtildiği üzere çıkıştaki toplamın aktivasyon fonksiyonu olarak ise purelin yani doğrusal bir fonksiyon kullanılmak istenmiştir. Bu model şekil 17.9 ile gösterilmiştir.

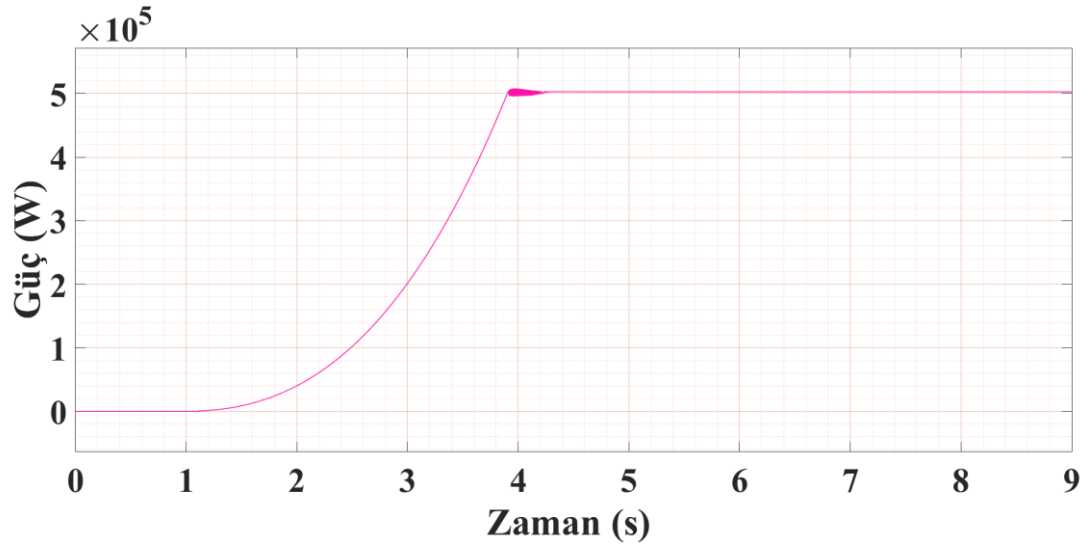


Şekil 17.9 YSA2 Adlı deneyin genel gösterimi

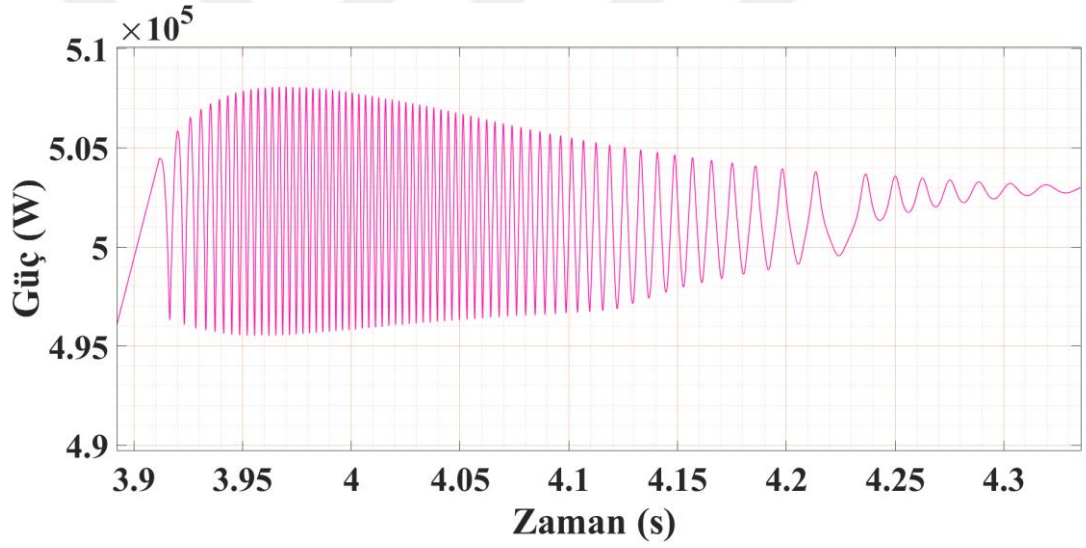
Bu ağın eğitim fonksiyonu olarak Levenberg-Marquardt geri yayılımı (trainlm) kullanılmıştır. Bu fonksiyon ile katmanlardaki hücreler arasındaki ağırlıklar ve katmanlardaki hücrelerin bias değerleri ayarlanmıştır.

Ağın düzgün eğitilebilmesi için adım sayısı (epochs) değeri yeterli sayıda tutulmalıdır. Bu deneyde epochs değeri 7300 seçilmiştir. Ağın ezberlemeden istenen işlevi öğrenebilmesi için seçilen epochs değeri önemlidir.

Şekil 15.3'teki rüzgâr değerinin rüzgâr türbini sistemine giriş olarak verilmesi ve bu ağ ile oluşturulan kontrolör sonucunda çıkış gücü şekil 17.10 ve şekil 17.11'deki gibi olmaktadır. Bu iki şekilden görüldüğü üzere güç karakteristiğimiz uygundur.



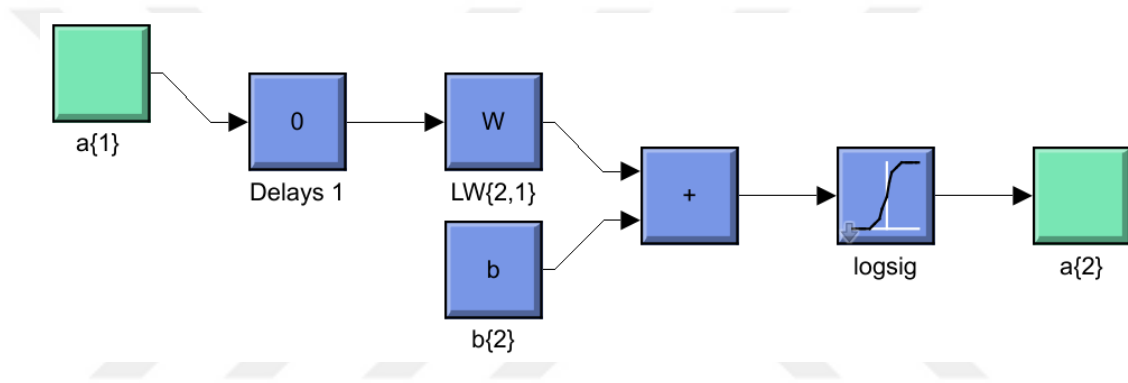
Şekil 17.10 YSA2 Deneyi Güç Çıkışı



Şekil 17.11 YSA2 Kontrolör 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı

17.4. YSA 3

Bu çalışmada yapay sinir ağları ile kontrolör oluşturulurken 3 katmanlı bir sistem modellenmiştir. Modellenen bu ağın giriş katmanı hücre sayısı 5, gizli katman sayısı 1 olup gizli katmandaki hücre sayısı 5, çıkış katmanı ise hücre sayısı ise 1 olarak seçilmiştir. Katmanlarda çeşitli aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Katmanlarda elde edilen toplamların çıkışını hesaplamak için logsig aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Ayrıca 16. Bölümde de belirtildiği üzere çıkıştaki toplamın aktivasyon fonksiyonu olarak ise purelin yani doğrusal bir fonksiyon kullanılmak istenmiştir. Bu model şekil 17.12 ile gösterilmiştir.

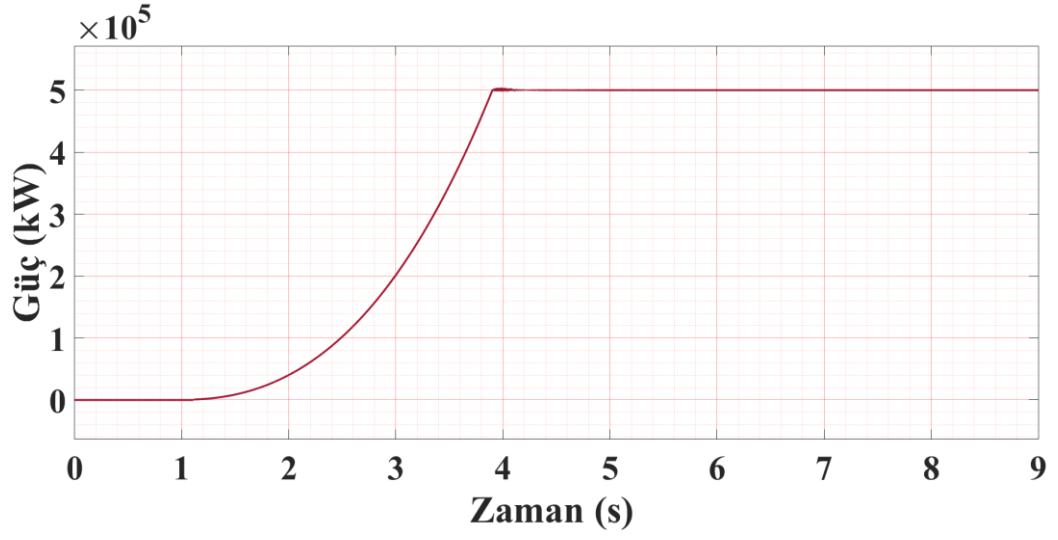


Şekil 17.12 YSA3 Deneyinin Modellemesi

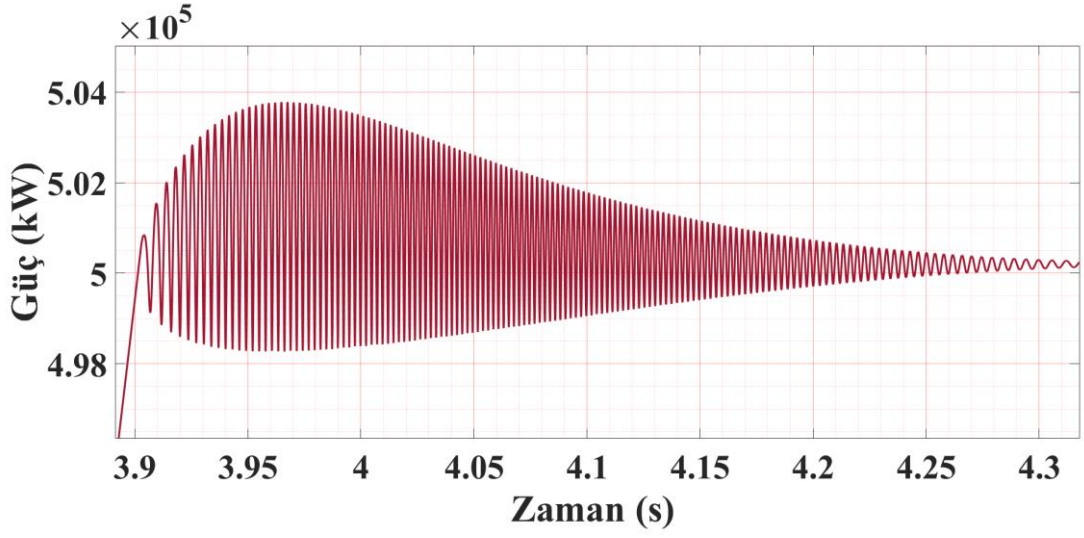
Bu ağın eğitim fonksiyonu olarak Levenberg-Marquardt geri yayılımı (trainlm) kullanılmıştır. Bu fonksiyon ile katmanlardaki hücreler arasındaki ağırlıklar ve katmanlardaki hücrelerin bias değerleri ayarlanmıştır.

Ağın düzgün eğitilebilmesi için adım sayısı (epochs) değeri yeterli sayıda tutulmalıdır. Bu deneyde epochs değeri 7367 seçilmiştir. Ağın ezberlemeden istenen işlevi öğrenebilmesi için seçilen epochs değeri önemlidir.

Şekil 15.3'teki rüzgâr değerinin rüzgâr türbini sistemine giriş olarak verilmesi ve bu ağ ile oluşturulan kontrolör sonucunda çıkış gücü şekil 17.13'teki ve şekil 17.14'teki gibi olmaktadır. Bu iki şekilden görüldüğü üzere güç karakteristiğimiz uygundur.



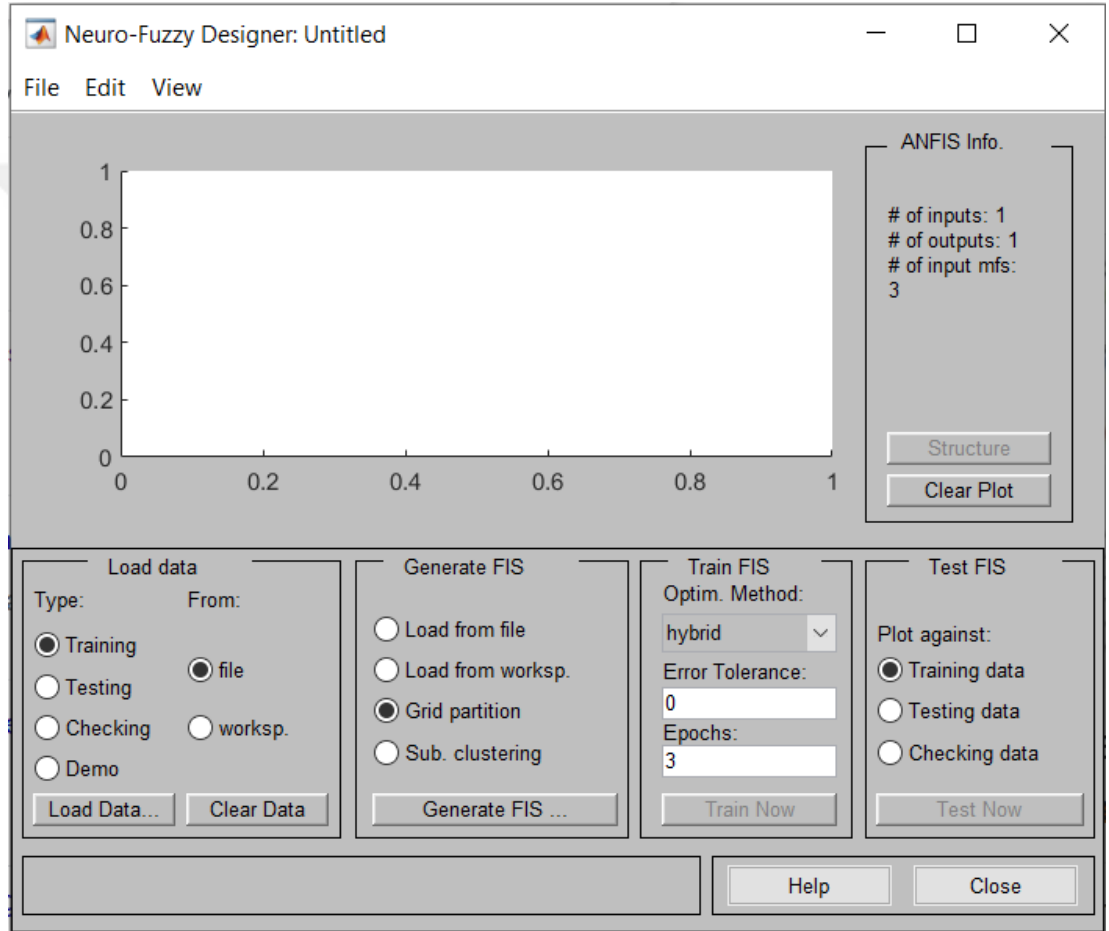
Şekil 17.13 YSA3 Deneyinin güç çıkışı



Şekil 17.14 YSA3 Kontrolör 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı

18. UYARLAMALI AĞ TABANLI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ (ANFIS) İLE KONTROLÖR TASARIMI

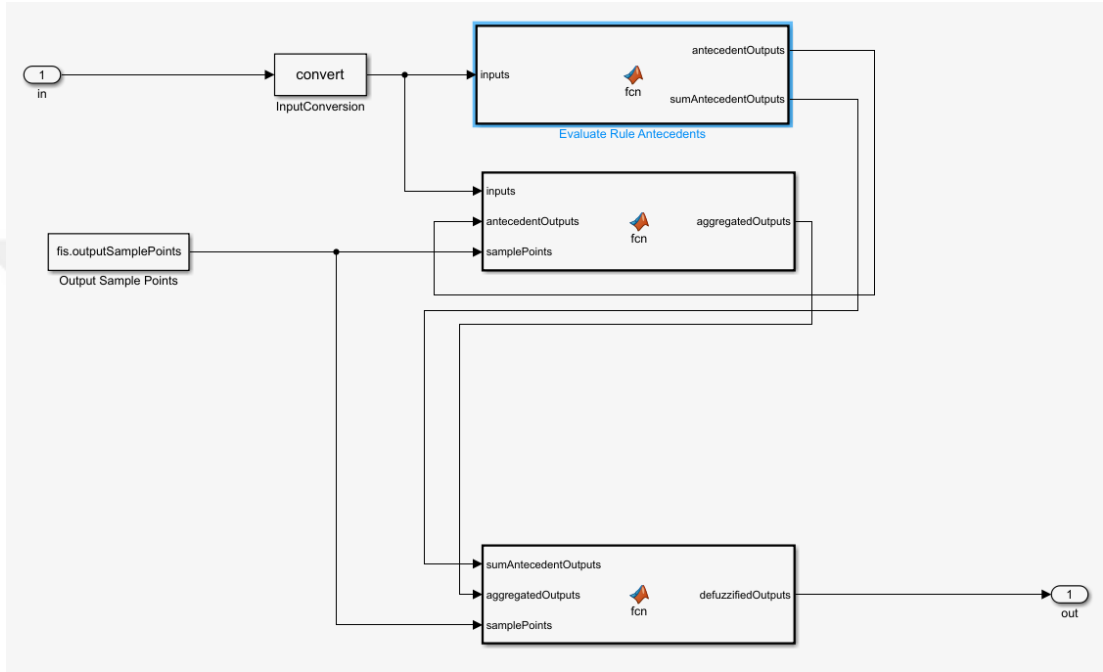
Bu tez çalışmasında Matlab neuro – fuzzy designer uygulaması kullanılarak bir ANFIS çalışması yapılmıştır. Bu uygulama Şekil 18.1 ve Şekil 18.2 ile gösterilmiştir. Neuro-Fuzzy Designer uygulaması, uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemleri tasarlamaya, eğitmenize ve test etmenize olanak tanır [73].



Şekil 18.1 ANFIS uygulaması ara yüzü

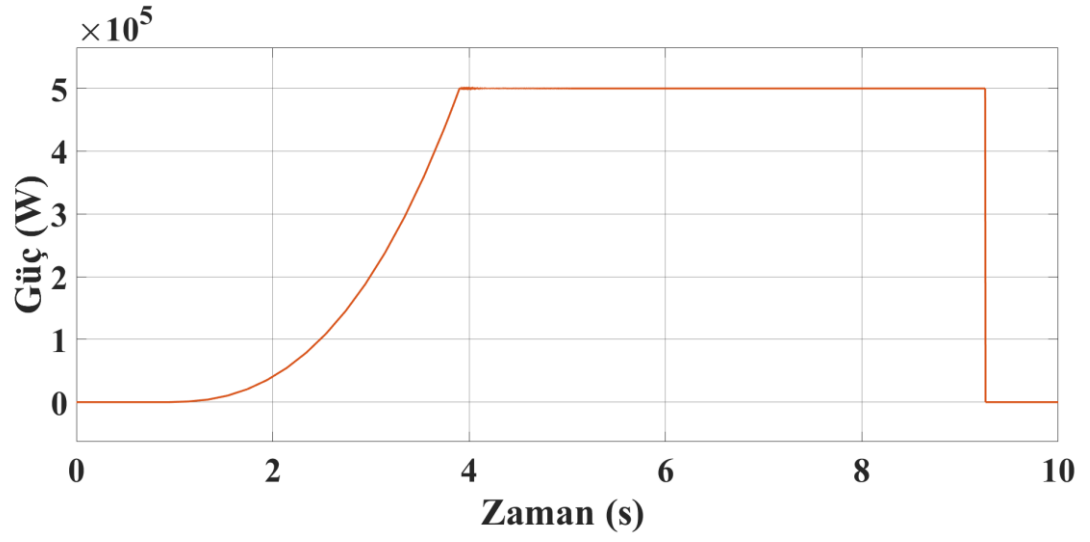
Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemlerinin üyelik fonksiyonu parametreleri ayarlanır. Eğitim verilerinize dayalı olarak bir ilk çıkarım sistemi yapısını otomatik olarak oluşturur. Ek kontrol parametreleri değiştirilerek özel ayarlamalar yapılır. İstenirse test verilerini kullanarak ayarlanmış sistemin genelleme yeteneğini test edilir. Sonuçta ayarlı bulanık çıkarım sistemi MATLAB çalışma alanına aktarılabilir.

ANFIS sistemleri tek çıkışa sahiptir. Ağırlıklı ortalama durulaştırmayı kullanır. Aynı türden çıktı üyelik fonksiyonlarına sahiptir, örneğin doğrusal veya sabit. Kural paylaşımı olmadan eksiksiz bir kural kapsamına sahiptir; yani, kuralların sayısı çıktı üyelik fonksiyonlarının sayısı ile eşleşmelidir ve her kuralın farklı bir sonucu olmalıdır [74].

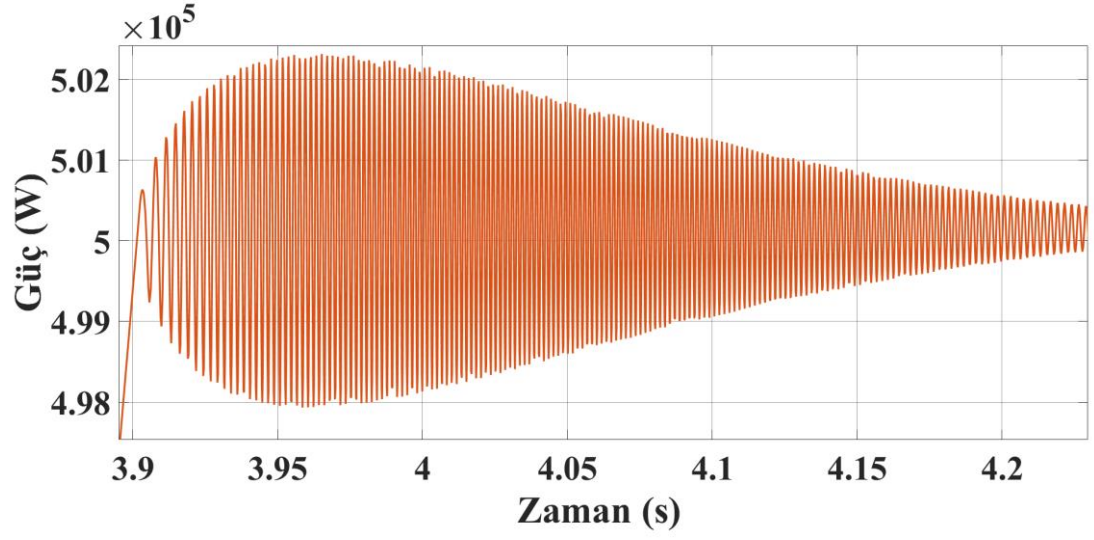


Şekil 18.2 ANFIS tasarımın blok modellemesi

ANFIS sistemi eğitilirken giriş değerlerinin ve çıkış değerlerinin birlikte olduğu bir matris dosyası ile çıkış ile giriş arasındaki kontrolör eğitilir. 90014x2'lik bir veri bu kontrolü eğitmek için kullanılmıştır. Eğitilen veriler simulink'e aktarılarak sonuçlar bulunmuştur. Rüzgâr türbini çıkış güçleri Şekil 18.3 ve şekil 18.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 18.3 ANFIS tasarım Güç Çıkışı



Şekil 18.4 ANFIS Kontrolör 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı

19. SONUÇLAR

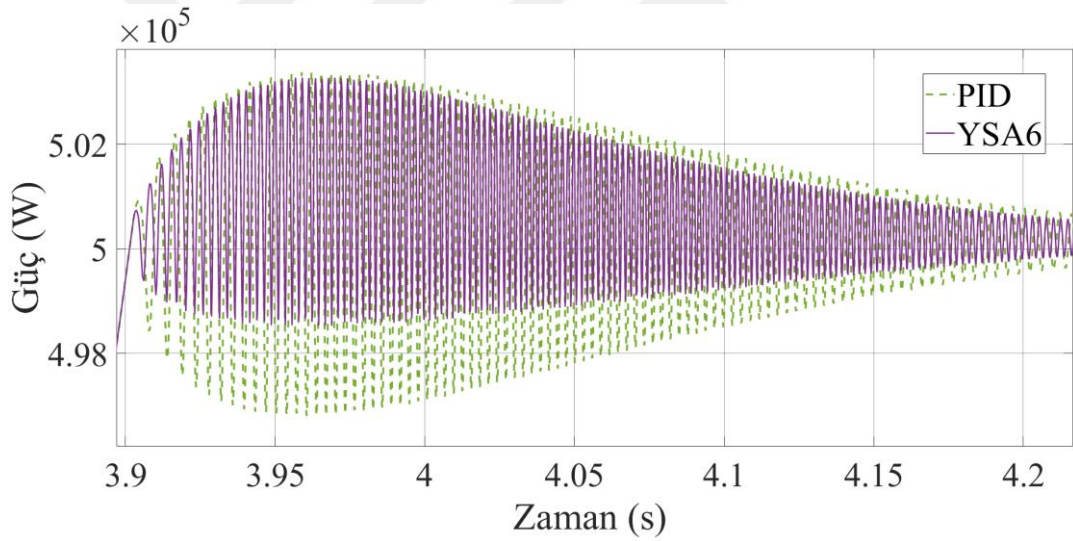
Çalışmalarımızın amacı, bilimsel bilgi birikimine ve literatüre katkı sağlamaktır. Bu amaçlar doğrultusunda bir rüzgâr türbini sistemi Matlab Simulink'te benzetilmiş, benzetilen rüzgâr türbininden yapay sinir ağları ve PID ile kontrol edilerek çıkış gücü elde edilmiş ve bu çıkış güçleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Matlab'te benzetilen bu sistem sonucunda şekil 19.1'deki karakteristik sonuçlar elde edilmiş, bu karakteristik sonuçlara ise rüzgâr türbinin kanat açısı kontrol edilerek ulaşılmıştır.

19.1. PID Sonuçları

Öncelikle rüzgâr türbini sisteminin kanat açısını kontrol etmek için PID kontrolör ile çıkış gücü incelenmiştir. Oransal kazancı -1 ve integratör kazancı -0.0001'dir. PID kontrolörün çıkışları şekil 16.3'te gösterilmiştir. Ayrıca şekil 16.4'te yakınlaştırılmış bir biçimde çıkış gücü gösterilmiştir. PID ile kurulan sistemde kanat açısı ayarlanarak oluşturulan ve ulaşılan uygun karakteristik sistemde maksimum tepe noktasına 3,965. saniyede 5,034e5 W ile ulaşılmıştır. Bu sistemin maksimum aşması (MPI) yüzde cinsinden %0,68 olmaktadır. Çıkış gücü salınımlarının bir süre daha devam edip dengeye ulaştığı şekil 16.3'te da görülmüştür.

19.2. YSA6 Sonuçları

YSA6 numaralı yapay sinir ağı benzetiminde Matlab Neural Network/Data Manager kullanılmış ve eğitim fonksiyonu olarak Levenberg-Marquardt fonksiyonu seçilmiştir. Aktivasyon fonksiyonu olarak tansig ve sadece çıkış katmanında purelin fonksiyonu seçilmiştir. Adım sayısı ise 10000 olarak belirlenmiştir. Bu yapay sinir ağının maksimum noktaya $5,033e5$ W gücünde ulaştığı görülmüş ve bu sistemin maksimum aşması (MYS6) yüzde cinsinden %0,66 olmuştur. Ancak şekil 14'te görüldüğü üzere PID ile kurulan sisteme nazaran PID gibi dengeli ve simetrik bir görüntüde değildir. Bu durum referans değerinin daha altındaki minimum değerler maksimum değerlere göre daha kısa olduğundan kaynaklanmıştır. Pozitif yanı ise benzetim yaptığımız YSA6, PID ile kurulan sistem ile neredeyse aynı zamanda kalıcı duruma ulaşmıştır. Kalıcı değere ulaştığı zaman ise 5,31. Saniyede olmaktadır.

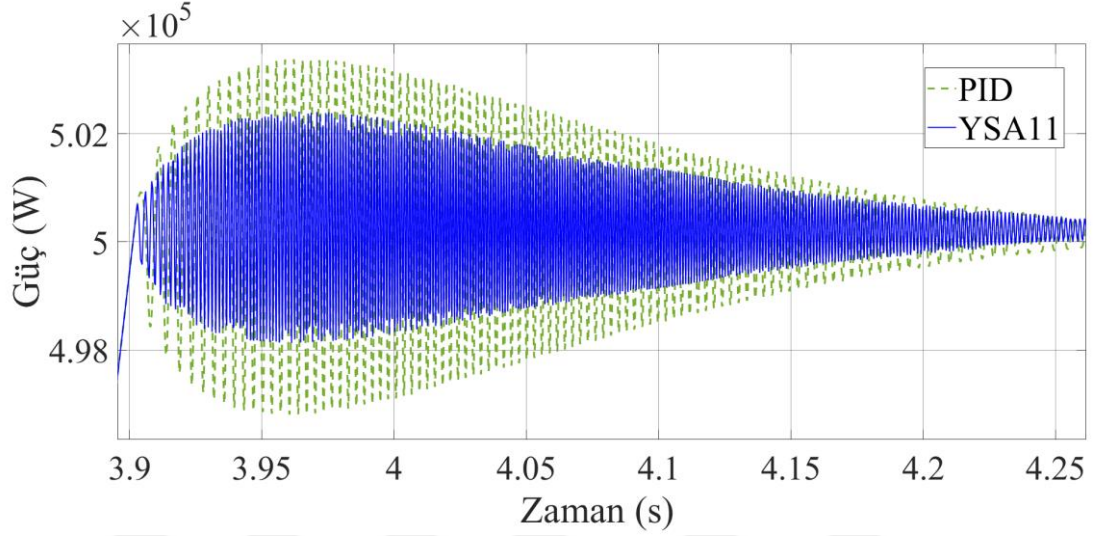


Şekil 19.1 PID Kontrolör ve YSA6 kontrolörleri 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı

19.3. YSA11 Sonuçları

Matlab Neural Network/Data Manager'da traingdx eğitim fonksiyonu ile hazırlanmış olan YSA11 isimli benzetimde aktivasyon fonksiyonları olarak logsig ve çıkış fonksiyonunda purelin fonksiyonu seçilmiştir. Adım sayısı olarak 2500 belirlenmiştir. Bu benzetimde maksimum çıkış gücü 3,964. saniyede $5,024e5$ W olmuş ve PID

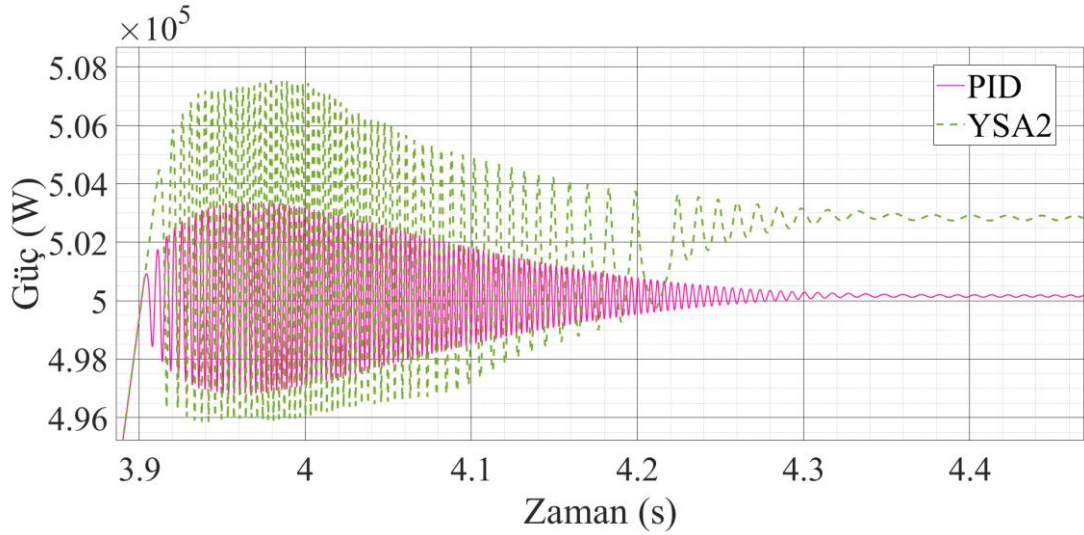
sonuçlarına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca şekil 14'te görüldüğü üzere daha iyi sönüm elde edilmiştir. Yani rüzgâr türbini çıkış gücü değerleri daha hızlı azalmıştır. Böylelikle YSA11 isimli benzetimin PID'e göre daha hızlı cevap verdiği görülmektedir. Bu sistemin maksimum aşması (MYSA11) yüzde olarak %0,48 olmaktadır. Bu değerler Şekil 19.2'de görülebilmektedir.



Şekil 19.2 PID Kontrolör ve YSA11 kontrolörleri 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı

19.4. YSA2 Sonuçları

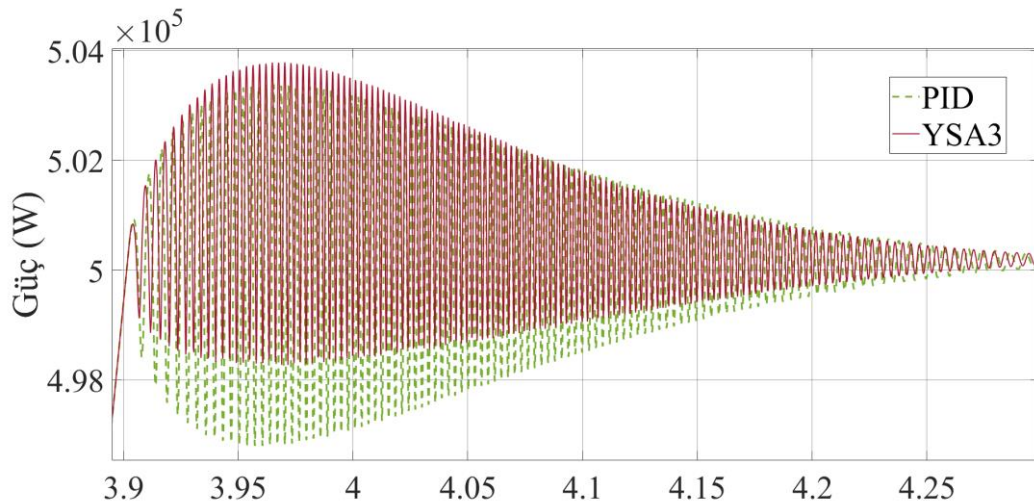
Bu yapay sinir ağında traingdx eğitim fonksiyonu kullanılmış olan YSA2 isimli benzetimde aktivasyon fonksiyonları olarak tansig ve sadece çıkış fonksiyonunda purelin fonksiyonu seçilmiştir. Adım sayısı olarak 7300 belirlenmiştir. YSA2 deneyi, yapay sinir ağı ile oluşturulan deneylere göre ve PID çıkışına göre daha kötü bir sonuç vermiştir. Bu deney sonucunda görülmektedir ki 3,97. saniyede maksimum değerine ulaşmıştır. Maksimum değeri 5,0808e5 olmaktadır. Maksimum aşması yüzde cinsinden %1,616 olmaktadır. 3,962. saniyede ise minimum noktasında değer vermektedir ve bu minimum değer 4,96e5 olmaktadır. Bu sinyalin durgun duruma ulaştığı değer 5,028e5'tir. Bu değerler Şekil 19.3'te görülebilmektedir.



Şekil 19.3 PID Kontrolör ve YSA2 kontrolörleri 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı

19.5. YSA3 Sonuçları

Levenberg-Marquardt eğitim fonksiyonu seçilerek Matlab'te hazırlanmıştır. Aktivasyon fonksiyonu olarak logsig ve son katmanda purelin fonksiyonu kullanılmıştır. YSA3 deneyi sonucunda görülmektedir ki 3,968. saniyede maksimum değerine ulaşmıştır. Bu değer $5,03773e5$ olmaktadır. Maksimum aşması yüzde cinsinden %0,755 olmaktadır. 3,966. saniyede ise minimum noktada değer vermektedir ve bu minimum değer $4,98267e5$ olmaktadır. Bu sinyalin durgun durum değeri $5,0018e5$ olmaktadır. Bu halde PID ile karşılaştırıldığında daha kötü sonuçları olduğu kabul edilebilir. Bu değerler Şekil 19.4'te görülebilmektedir.

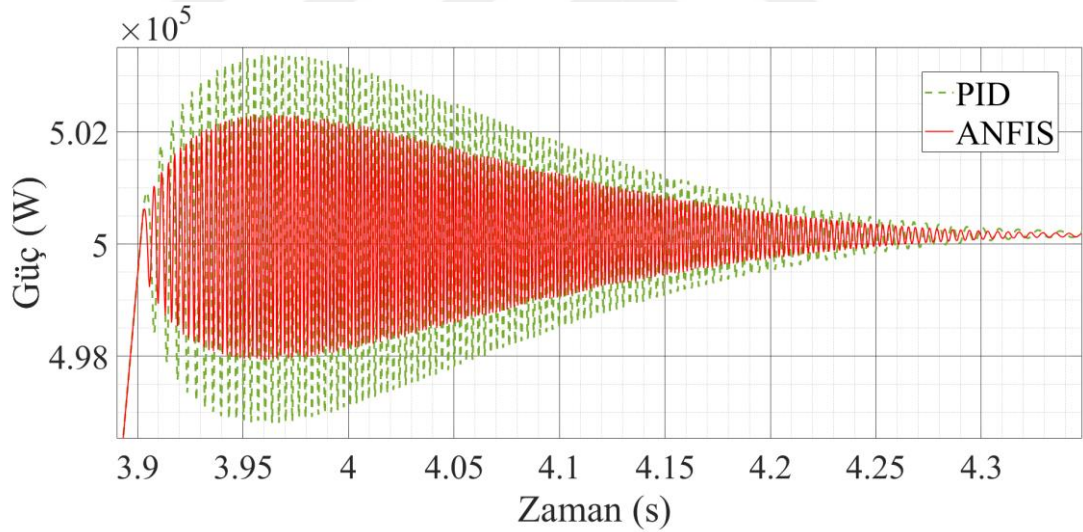


Şekil 19.4 PID Kontrolör ve YSA3 kontrolörleri 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı

19.6. Anfis Sonuçları

Matlab programı kullanılarak oluşturuldu. Matlab içerisinde yer alan uygulamalarda control system design and analysis başlığı altında bulunan neuro-fuzzy designer (NFD) aracı ile tasarlanmıştır. NFD kullanıcı dostu ara yüze sahip bir araç olarak Matlab'te yer almaktadır. Training verileri çalışma alanından ara yüz kullanılarak çekilir.

Anfis deneyi sonucunda görülmektedir ki 3,965. saniyede maksimum değerine ulaşmıştır. Bu değer $5,02316e5$ olmaktadır. Maksimum aşması yüzde cinsinden %0.46 olmaktadır. Bu değer yapılan deneyler arasındaki en iyi değer olarak öne çıkmaktadır. 3,959. saniyede ise minimum noktasında değer vermektedir ve bu minimum değer $4,97928e5$ olmaktadır. Bu sinyalin kalıcı durum değeri $5,00152e5$ olmaktadır. Bu halde PID ile karşılaştırıldığında daha iyi sonuçları olduğu görülebilmektedir. Bu değerler Şekil 19.5'te görülebilmektedir.



Şekil 19.5 PID Kontrolör ve ANFIS kontrolörleri 3.9-4.4. saniyeler arası Güç Çıkışı

20. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Rüzgâr temiz bir yakıttır. Bu yakıt rüzgâr türbinlerinde kullanılır. Kaynağı ise güneştir. Güneş yaşama kaynağımız olduğu gibi yakıt kaynağımız konumuna da gelmiştir. Öyle ki bitmeyen rüzgarlar ile döndürülen bu irili ufaklı türbinlerden elde edilen elektrik kablolar yardımıyla aletlere ve mekanlara ulaştırılır.

Değişken doğa olayları karşısında değişken tepki verebilen, değişken hızlı rüzgâr türbinleri sabit hızda çalışanlar yerine bu çalışmada kullanılmıştır. Kullanılan bu türbin Matlab/Simulink aracılığıyla bilgisayar ortamında benzetilerek oluşturulmuştur. Oluşturulan bu sistemde çıkış gücünün kanat açısı kontrol yardımıyla ayarlanarak belirli bir değerde olması amaçlanmıştır. Çıkış gücü ne kadar kontrol edilebilirse yani ne kadar optimal değerini korursa bu, o kadar iyi bir sistemdir denir. İyi sistemler kararlı ve salınımı az olan sistemlerdir. İşte bu çalışmada tam olarak bu amaçlanmıştır; kararlı ve çıkış gücü salınımları az olan sistemler. Amaçlarımızın sonuçlarının da kararlı olduğu görülmüştür. Bu görüntüler de 18. bölümde paylaşılmıştır.

Rüzgâr türbininde bulunan çeşitli sensörler sayesinde türbindeki jeneratörün çıkış gücü veyahut çıkış torku değerleri veriler halinde saklanabilir. Bu çalışmada sensörler 500 kW gücündeki bir jeneratörün çıkış gücünü benzetim yoluyla bizlere sunmuştur. Kullanılan bu türbin nominal değer yani 500 kW gücünü kontrol edilerek göstermiştir.

Çıkış gücünün kontrol edilmesi kanatların açısının kontrol edilmesiyle sağlanabilir. Her bir kanat bağlı dc servo motor olduğu düşünülerek benzetim alanına eklenmiştir. DC servo motorlar kanatları hareket ettirerek kanatların açısını ayarlar. Bu demektir ki servo motor çıkışları kanat açılara eşittir. Bu kanat açısı değeri güç katsayısını etkilemek üzere rüzgâr türbinine yollanır. Rüzgâr türbininde çeşitli matematiksel ifadelerde kullanılır.

Ayarlanan bu kanatlar belirli bir düzene göre hareket etmelidir. Açılar doğru ayarlanırsa çıkış gücü de o derece doğru olacaktır. İşte bu noktada kanat açısı kontrolör yöntemleri devreye girer. Sektörel anlamda birçok kontrol yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazılarının eskidiği bazılarının ise yeni yeni denendiği açıktır. Gelişen teknolojiyle beraber artan kararlılık, pratiklik ve hızlı cevap verme yeteneğine sahip olmadığı düşünülen eski kontrolörlerin yerine araştırılıp geliştirilen ve ilk önce benzetimi yapılan yeni kontrolör yöntemleri bulunmaktadır. Bu çalışma da eski

kontrolör yöntemi sayılan PID kontrolör ile ve son günlerde sıkça duyduğumuz yapay sinir ağları (YSA) ve daha az popüler olan uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kararlılığı değişken rüzgâr hızına karşılık nasıl bir karakteristik yol izlediğini araştırmaktadır. Yapay sinir ağı ile hazırlanan benzetimlerde dört farklı sinir ağı kullanılmıştır. Oluşturulan bu sinir ağlarının parametreleri yani eğitim fonksiyonları, aktivasyon fonksiyonları veya katmanlardaki hücre sayıları farklıdır. Bu değişiklikler sonuçlarda gözle görülür etkiler yapmaktadır. Bu etkiler kararlılık ve salınımları da etkilemektedir. Yapay sinir ağlarının önemli tarafı ANFIS sistemlerde olduğu gibi sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymamasıdır. Böylelikle giriş ve çıkış değerleri arasındaki ilişkiyi öğrenerek çalışmalarını sürdürürler.

PID ile kurulan sistemde kanat açısı ayarlanarak oluşturulan ve ulaşılan uygun karakteristik sistemde maksimum tepe noktasına 3,965. saniyede 5,034e5 W ile ulaşılmıştır. Bu sistemin maksimum aşması (MPI) yüzde cinsinden %0,68 olmaktadır. Çıkış gücü salınımlarının bir süre daha devam edip dengeye ulaştığı şekil 10'da da görülmüştür. YSA6 isimli deneyin sonucunda maksimum noktaya 5,033e5 W gücünde ulaştığı görülmüş ve bu sistemin maksimum aşması (MYSA6) yüzde cinsinden %0,66 olmuştur. Ancak şekil 14'te görüldüğü üzere PID ile kurulan sisteme nazaran PID gibi dengeli ve simetrik bir görüntüde değildir. Bu durum referans değerinin daha altındaki minimum değerler maksimum değerlere göre daha kısa olduğundan kaynaklanmıştır. Bu benzetimde maksimum çıkış gücü 3,964. saniyede 5,024e5 W olmuş ve PID sonuçlarına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. YSA2 ve YSA3 isimli deneylerde elde edilen sonuçlar aşma değerleri bakımından daha fazla sonuçlar içermiştir. Anfis deneyi sonucunda görülmektedir ki 3,965. saniyede maksimum değerine ulaşmıştır. Bu değer 5,02316e5 olmaktadır. Maksimum aşması yüzde cinsinden %0.46 olmaktadır. Bu değer yapılan deneyler arasındaki en iyi değer olarak öne çıkmaktadır. 3,959. saniyede ise minimum noktasında değer vermektedir ve bu minimum değer 4,97928e5 olmaktadır. Bu sinyalin kalıcı durum değeri 5,00152e5 olmaktadır. Bu halde PID ile karşılaştırıldığında daha iyi sonuçları olduğu görülebilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] A. V. Da Rosa ve J. C. Ordonez, *Fundamentals of renewable energy processes*. Academic Press, 2021.
- [2] *Environmental Impacts of Wind-Energy Projects*. THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, 2007.
- [3] J. K. Kaldellis ve D. Zafirakis, “The wind energy (r)evolution: A short review of a long history”, *Renewable Energy*, c. 36, sy 7, ss. 1887-1901, Tem. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2011.01.002.
- [4] “Enerji Görünümü 2021”, Türkiye Sınai Kalkınma Bankası AŞ., 2021.
- [5] “Türkiye’nin rüzgar enerjisi kurulu gücü 10 bin megavattı aştı”. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/turkiyenin-ruzgar-enerjisi-kurulu-gucu-10-bin-megavati-asti/2329703> (erişim 14 Ocak 2022).
- [6] “Temmuz 2021 Raporu”, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB).
- [7] “Global Wind Report 2021”, Global Wind Energy Council, 2021.
- [8] “World’s tallest on land wind farm planned for Scottish site”. <https://www.scotsman.com/news/environment/worlds-tallest-land-wind-farm-planned-scottish-site-3137060> (erişim 14 Şubat 2022).
- [9] A. Frangoul, “Vestas to install prototype of world’s ‘tallest and most powerful wind turbine’ in 2022”, *CNBC*, 18 Ekim 2021. <https://www.cnbc.com/2021/10/18/vestas-to-install-prototype-of-most-powerful-wind-turbine.html> (erişim 14 Şubat 2022).
- [10] D. Roberts, “These huge new wind turbines are a marvel. They’re also the future.”, *Vox*, 08 Mart 2018. <https://www.vox.com/energy-and-environment/2018/3/8/17084158/wind-turbine-power-energy-blades> (erişim 18 Şubat 2022).
- [11] “To Get Wind Power You Need Oil”, *IEEE Spectrum*, 29 Şubat 2016. <https://spectrum.ieee.org/to-get-wind-power-you-need-oil> (erişim 17 Ocak 2022).
- [12] “Wind power is crucial for combating climate change”, Global Wind Energy Council.
- [13] A. Kalmikov, “Chapter 2 - Wind Power Fundamentals”, içinde *Wind Energy Engineering*, T. M. Letcher, Ed. Academic Press, 2017, ss. 17-24. doi: 10.1016/B978-0-12-809451-8.00002-3.
- [14] Bin Wu, Yongqiang Lang, Navid Zargari, ve Samir Kouro, “Fundamentals of Wind Energy Conversion System Control”, içinde *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*, IEEE, 2011, ss. 25-47. doi: 10.1002/9781118029008.ch2.
- [15] “Offshore Wind Turbine SG 14-222 DD I Siemens Gamesa”. <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-14-222-dd> (erişim 14 Şubat 2022).
- [16] “Onshore & Offshore Wind: Genel Bakış | LinkedIn”. <https://www.linkedin.com/showcase/offshore-wind-&-subsea-cables/?originalSubdomain=kw> (erişim 18 Şubat 2022).
- [17] “Rotor Locks”. <https://www.altramotion.com/en/key-markets/Wind-Turbine/rotor-brakes/rotor-locks> (erişim 18 Şubat 2022).
- [18] “Wind turbines generators - Generators”. <https://acim.nidec.com/generators/leroy-somer/products/power-alternators/alternators-for-windturbines> (erişim 18 Şubat 2022).

- [19] “Yaw Control Gear Motor - 700 TW”. <https://www.icpwind.com/bonfiglioli-700-tw-yaw-control-gear-motor.html> (erişim 18 Şubat 2022).
- [20] İzzet ALAGÖZ, *Rüzgar Elektrik Santralleri - Kontrol Algoritmaları*, 1. bs. 2021.
- [21] “anemometer wind vane moving clouds background”, *Shutterstock*. <https://www.shutterstock.com/tr/video/clip-10817402-anemometer-wind-vane-moving-clouds-background-loop> (erişim 18 Şubat 2022).
- [22] M. Apaydin, A. K. Üstün, M. Kurban, ve Ü. B. FiLiK, “RÜZGÂR ENERJİSİNDE KULLANILAN ASENKRON JENERATÖRLER”, s. 5.
- [23] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, ve S. Kouro, “Wind Generators and Modeling”, içinde *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*, 2011, ss. 49-85. doi: 10.1002/9781118029008.ch3.
- [24] S. J Chapman, *Electric machinery fundamentals*. McGraw-hill, 2004.
- [25] Z. Özer ve A. S. YILMAZ, “Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanılan generatörlerin denetimi”, 2005.
- [26] E. K. E. Mjabber, A. E. Hajjaji, ve A. Khamlichi, “Analysis of a RBF Neural Network Based Controller for Pitch Angle of Variable-Speed Wind Turbines”, *Procedia Engineering*, c. 181, ss. 552-559, Oca. 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.433.
- [27] A. S. Yilmaz ve Z. Özer, “Pitch angle control in wind turbines above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural networks”, *Expert Systems with Applications*, c. 36, sy 6, ss. 9767-9775, 2009.
- [28] R. Tiwari ve N. R. Babu, “Comparative analysis of pitch angle controller strategies for PMSG based wind energy conversion system”, *Int. J. Intell. Syst. Appl*, c. 9, sy 5, ss. 62-73, 2017.
- [29] A. Dahbi, N. Nait-Said, ve M.-S. Nait-Said, “A novel combined MPPT-pitch angle control for wide range variable speed wind turbine based on neural network”, *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 41, sy 22, ss. 9427-9442, Haz. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.105.
- [30] C. Wei, Z. Zhang, W. Qiao, ve L. Qu, “An adaptive network-based reinforcement learning method for MPPT control of PMSG wind energy conversion systems”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 31, sy 11, ss. 7837-7848, 2016.
- [31] X. Yin, W. Zhang, Z. Jiang, ve L. Pan, “Adaptive robust integral sliding mode pitch angle control of an electro-hydraulic servo pitch system for wind turbine”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, c. 133, s. 105704, 2019.
- [32] X. Jiao, W. Meng, Q. Yang, L. Fu, ve Q. Chen, “Adaptive continuous neural pitch angle control for variable-speed wind turbines”, *Asian Journal of Control*, c. 21, sy 4, ss. 1966-1979, 2019.
- [33] M. A. Rahman ve A. Rahim, “Performance evaluation of ANN and ANFIS based wind speed sensor-less MPPT controller”, içinde *2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*, 2016, ss. 542-546.
- [34] V. L. Narayanan ve R. Ramakrishnan, “Design and implementation of an intelligent digital pitch controller for digital hydraulic pitch system hardware-in-the-loop simulator of wind turbine”, *International Journal of Green Energy*, c. 18, sy 1, ss. 17-36, 2021.
- [35] D. Zhang, Y. Yang, ve H. Fang, “A Comparative Study for Multilayer Perception versus Convolutional Neural Network Based On the Wind Turbine Benchmark Model”, içinde *2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2021, ss. 3645-3649. doi: 10.1109/CCDC52312.2021.9602313.

- [36] Z. Civelek ve M. Lüy, “Bulanık PID kontrolör ile rüzgâr türbininin hatve açısının kontrolü”.
- [37] S. A. Raza, “Smart pitch control strategy for wind generation system using doubly fed induction generator”, M.S., Ann Arbor, United States. Erişim: 06 Ekim 2021. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.proquest.com/docview/1313228891/abstract/378D4E2CA1AD4346PQ/1>
- [38] J. Chen vd., “Adaptive Pitch Control of Variable-Pitch PMSG Based Wind Turbine”, *Applied Sciences*, c. 9, s. 4109, Eki. 2019, doi: 10.3390/app9194109.
- [39] H. Erol, “Stability analysis of pitch angle control of large wind turbines with fractional order PID controller”, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, c. 26, s. 100430, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100430>.
- [40] “Wind Turbines: the Bigger, the Better”, *Energy.gov*. <https://www.energy.gov/eere/articles/wind-turbines-bigger-better> (erişim 18 Şubat 2022).
- [41] J. F. Manwell, J. G. McGowan, ve A. L. Rogers, *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [42] A. Rolan, A. Luna, G. Vazquez, D. Aguilar, ve G. Azevedo, “Modeling of a variable speed wind turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator”, içinde *2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2009, ss. 734-739. doi: 10.1109/ISIE.2009.5218120.
- [43] T. Senjyu, R. Sakamoto, N. Urasaki, T. Funabashi, H. Fujita, ve H. Sekine, “Output power leveling of wind turbine Generator for all operating regions by pitch angle control”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 21, sy 2, ss. 467-475, 2006, doi: 10.1109/TEC.2006.874253.
- [44] E. Chavero-Navarrete, M. Perea, J. Jauregui, R. Carrillo-Serrano, ve G. J. Moreno, “Expert Control Systems for Maximum Power Point Tracking in a Wind Turbine with PMSG: State of the Art”, *Applied Sciences*, c. 9, s. 2469, Haz. 2019, doi: 10.3390/app9122469.
- [45] S. A. Eisa, W. Stone, ve K. Wedeward, “Mathematical modeling, stability, bifurcation analysis, and simulations of a type-3 dfig wind turbine’s dynamics with pitch control”, içinde *2017 ninth annual IEEE green technologies conference (GreenTech)*, 2017, ss. 334-341.
- [46] R. C. Dorf ve R. H. Bishop, *Modern control systems*. Pearson Prentice Hall, 2008.
- [47] Zafer BİNGÜL, *MATLAB ve SIMULINK’le Modelleme/Kontrol I*. 2005.
- [48] İbrahim YÜKSEL, *Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri*, 8. bs. 2012.
- [49] H. P. Hsu, *Theory and Problems of Signals and Systems*. McGraw-Hill New York, 1995.
- [50] G. F. Franklin, J. D. Powell, A. Emami-Naeini, ve J. D. Powell, *Feedback control of dynamic systems*, c. 4. Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [51] M. A. Johnson ve M. H. Moradi, *PID control*. Springer, 2005.
- [52] V. NABIYEV, *Yapay Zeka (Artificial Intelligence)*. 2021.
- [53] “Nöron ve Glia Hücreleri”, *Doktor Fizik*, 28 Aralık 2019. <https://www.doktorfizik.com/sinir-sistemi/norobilim/noron-ve-glia-hucreleri/> (erişim 18 Şubat 2022).
- [54] R. Jayawardana ve T. Bandaranayake, *ANALYSIS OF OPTIMIZING NEURAL NETWORKS AND ARTIFICIAL INTELLIGENT MODELS FOR GUIDANCE, CONTROL, AND NAVIGATION SYSTEMS*. 2021.

- [55] Çetin Elmas, *Yapay Zeka Uygulamaları*, 2. bs.
- [56] T. J. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons, 2005.
- [57] İ. H. Altaş, “Bulanık Mantık: Bulanıklılık Kavramı”, *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, c. 62, ss. 80-85, 1999.
- [58] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets”, *Information and Control*, c. 8, sy 3, ss. 338-353, 1965, doi: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
- [59] L. A. Zadeh, “Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, c. SMC-3, sy 1, ss. 28-44, 1973, doi: 10.1109/TSMC.1973.5408575.
- [60] L. A. Zadeh, “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I”, *Information Sciences*, c. 8, sy 3, ss. 199-249, 1975, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5).
- [61] Ç. Elmas, “Bulanık mantık denetleyiciler”, 2003.
- [62] P. Albertos, A. Sala, ve M. Olivares, “Fuzzy logic controllers. Advantages and drawbacks”, içinde *VIII international congress of automatic control*, 1998, c. 3, ss. 833-844.
- [63] Zekai ŞEN, *BULANIK MANTIK İLKELERİ ve MODELLEME*, 3. bs. 2009.
- [64] İ. H. Altaş, “Bulanık mantık: Bulanık denetim”, *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, c. 64, sy 1999, ss. 76-81, 1999.
- [65] “Fuzzy Logic Toolbox”. <https://uk.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html> (erişim 18 Şubat 2022).
- [66] “Mamdani Fuzzy Model”. <https://researchhubs.com/post/engineering/fuzzy-system/mamdani-fuzzy-model.html> (erişim 17 Ocak 2022).
- [67] S. Chakraverty, D. M. Sahoo, ve N. R. Mahato, “Defuzzification”, içinde *Concepts of Soft Computing*, Springer, 2019, ss. 117-127.
- [68] J.-S. R. Jang, “ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, c. 23, sy 3, ss. 665-685, 1993, doi: 10.1109/21.256541.
- [69] Onur DOĞAN, “Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sisteminin (ANFIS) Talep Tahmini İçin Kullanımı ve Bir Uygulama”, c. 31, sy 1, ss. 257-288, 2016, doi: <https://doi.org/10.24988/deuiibf.2016311513>.
- [70] S.-L. Jui *vd.*, “Brain MRI Tumor Segmentation with 3D Intracranial Structure Deformation Features”, *Intelligent Systems, IEEE*, c. 31, ss. 66-76, Mar. 2016.
- [71] A. V. A. Macêdo ve W. S. Mota, “Wind turbine pitch angle control using Fuzzy Logic”, içinde *2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T D-LA)*, 2012, ss. 1-6. doi: 10.1109/TDC-LA.2012.6319100.
- [72] “Mean squared error”, *Wikipedia*. 10 Ocak 2022. Erişim: 13 Ocak 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mean_squared_error&oldid=1064821920
- [73] “Design, train, and test Sugeno-type fuzzy inference systems - MATLAB”. <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/neurofuzzydesigner-app.html> (erişim 13 Ocak 2022).
- [74] “Tune Sugeno-type fuzzy inference system using training data - MATLAB anfis”. <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/anfis.html> (erişim 14 Ocak 2022).

ÖZGEÇMİŞ

1. Adı Soyadı : Atakan ARSLAN

2. Doğum Tarihi :

4. Öğrenim Durumu : Lisans

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Bitirme Yılı
Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2019
Yüksek Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2022

5. Akademik Ünvanlar:

6. İş Tecrübesi:

7. Yayınlar:

A. Arslan ve H. Erol , "ANALYSIS OF WIND TURBINE BLADE PITCH ANGLE CONTROL WITH FUZZY LOGIC", *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, c. 5, sayı. 1, ss. 18-22, Haz. 2022

A. Arslan ve H. Erol, "RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT AÇISININ YAPAY SINIR AĞLARI VE ANFIS İLE KONTROLÜ", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* (İnceleme Aşamasında)

A. Arslan ve H. Erol, "RUZGAR TURBİNİ KANATCIK ACI KONTROLÜNÜN BULANIK MANTIK İLE ANALIZI", *The 3rd International Conference of Materials and Engineering Technology (TICMET'21)* (Özet)

8. Yazılan uluslararası kitaplar veya kitaplarda bölümler:

9. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

10. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

11. Diğer yayınlar:

12. Projeler:

13. Bilimsel Kuruluşlara Üyelikler:

14. Ödüller:



OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 11/04/2022

Tez Başlığı / Konusu: Rüzgar Türbini Kanat Açısının Yapay Sinir Ağları ile Kontrolü

Yukarıda başlığı/konusu belirlenen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Özet ve Abstract, c) Giriş, d) Ana bölümler ve e) Sonuç, f) Kaynakça kısımlarından oluşan toplam 96 sayfalık kısmına ilişkin, 11/04/2022 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme tiplerinden biri uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 10'dur.

Filtreleme Tip 1 (maksimum %30)

1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,
2- Kaynakça hariç,
3- Alıntılar dahil,
4- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç.

Filtreleme Tip 2 (maksimum %10)

1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,
2- Kaynakça hariç,
3- Alıntılar hariç,
4- 5 Kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç.

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Atakan ARSLAN

Öğrenci No:

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı:

Statüsü: Y.Lisans Doktora

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Doç. Dr. Halil EROL

RAPORU DÜZENLEYEN

Arş. Gör. Yunus Ziya KAYA